

**IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE TOLERANCIA Y
RESISTENCIA DE 20 VARIEDADES DE PAPA COMERCIAL FRENTE AL
ATAQUE DE LA POLILLA GUATEMALTECA DE LA PAPA (*Tecia solanivora*
Povolný)**

MARÍA FERNANDA DÍAZ NIÑO

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA APLICADA**

**BOGOTÁ D.C.
2015**

**IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE TOLERANCIA Y RESISTENCIA DE
20 VARIEDADES DE PAPA COMERCIAL FRENTE AL ATAQUE DE LA POLILLA
GUATEMALTECA DE LA PAPA (*Tecia solanivora* Povolný)**

MARÍA FERNANDA DÍAZ NIÑO

Trabajo de grado realizado para obtener el título de especialista en estadística aplicada.

DIRECTOR:
WILMER PINEDA RÍOS
Candidato a Magister Ciencias - Estadística.

DIRECTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:
DRA. KATJA POVEDA

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA APLICADA**

**BOGOTÁ D.C.
2015**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado: Ana María Gómez Lamus

Jurado: Cecy Alexandra Penagos

Bogotá, D.C. 11 de junio de 2015.

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Katja Poveda, por permitirme hacer parte del equipo de trabajo del proyecto “*Sustainable pest management and yield increase strategies through ecological, genetic and economic analysis*” a través de la Fundación Biodiversa Colombia y la Universidad Nacional de Colombia. A la Fundación Universitaria Los Libertadores y mi director, por todo su apoyo y comprensión para el desarrollo del presente trabajo.

A mi padre, por estar a mi lado siempre, por ser mi motor día a día. A mi madre y hermanos, por su apoyo y su amor.

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE TABLAS	1
LISTADO DE FIGURAS	2
LISTADO DE ANEXOS	3
GLOSARIO	4
RESUMEN - ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 El sistema productivo de papa en Colombia:	8
1.2 La Polilla Guatemalteca de la papa <i>Tecia solanivora</i> Povolný (Lepidoptera: Gelechiidae).....	9
1.3 La defensa de las plantas frente a la herbivoría:	10
2. OBJETIVO GENERAL	12
2.1 Objetivos específicos	12
3. METODOLOGÍA	13
3.1 Experimento no. 1 preferencia de oviposición:.....	13
3.2 Experimento no. 2 tolerancia:	16
3.3 Experimento no. 3 resistencia:	18
4 RESULTADOS.....	24
4.1 Experimento no.1:.....	24
4.1.1. Hipótesis planteadas:.....	24
4.1.2 Resultados obtenidos en R:	24
4.2 Experimento no. 2: tolerancia	26
4.2.1 Hipótesis planteadas:.....	26
4.2.2 Resultados análisis multivariado (MANOVA):	27
4.2.3 Implementación del test de Mardia:.....	27
4.2.4 Implementación del test T-Student:.....	30
4.3 Experimento no.3: resistencia:	31
4.3.1 Modelo lineal generalizado de Poisson:.....	32
4.3.2 Planteamiento de las hipótesis:	32
4.3.3 Modelo para conteos inflados con ceros:	34
4.3.4 Test de Vuong:.....	35
4.3.5 Bioensayo con <i>Spodoptera frugiperda</i> :	35
5. DISCUSIÓN:	37
6. CONCLUSIONES.....	39
7. TRABAJOS CITADOS.....	40
8. ANEXOS:	43

LISTADO DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Variables categóricas y variables respuesta definidas para cada experimento	13
Tabla 2	Análisis de varianza (ANOVA) para la variable respuesta no de Huevos.....	24
Tabla 3	Test de Shapiro-Wilk y Kruskal Wallis para la variable no. De huevos.....	24
Tabla 4	Resultado de la implementación de la prueba de comparación múltiple para la variable respuesta no. De huevos y cada variedad de papa.....	25
Tabla 5	Planteamiento de las hipótesis para el MANOVA del experimento denominado "Tolerancia".....	26
Tabla 6	Análisis de varianza (MANOVA) para la variables respuesta no. de tubérculos sano y peso de los mismos	27
Tabla 7	Resultado en R de la implementación del test de Mardia para verificación de la normalidad de los residuales en el análisis multivariado.....	28
Tabla 8	Resultado en R de la implementación del análisis multivariado por permutaciones.....	28
Tabla 9	Resultado de la implementación del test T-Student para comparación de medias de cada tratamiento por cada variedad de papa utilizada.....	30
Tabla 10	Planteamiento de las hipótesis para el análisis del experimento denominado "resistencia"...	32
Tabla 11	Detalle del resultado en R correspondiente a la implementación del modelo lineal generalizado de Poisson para el análisis de la variable no. De individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados en cada variedad y tratamiento.....	33
Tabla 12	Detalle del resultado en R correspondiente a la implementación del modelo para conteos inflados con ceros, implementado para el análisis de la variable respuesta no. De individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados en cada variedad y tratamiento.....	34
Tabla 13	Resultado en R correspondiente a la implementación del test de Vuong.....	35
Tabla 14	Análisis de varianza para la variable respuesta "diferencia en el peso de las larvas de <i>S. frugiperda</i> ": resultados del test de Shapiro - Wilk.....	35
Tabla 15	Resultado en R correspondiente a la implementación del ANOVA Robusta para análisis de los datos del Bioensayo con <i>S. frugiperda</i>	36

LISTADO DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Metodología implementada para el desarrollo del experimento no. 1 denominado “preferencia de oviposición”	14
Figura 2	Boxplot para la variable “número de huevos”, como respuesta al experimento denominado “preferencia de oviposición”	26
Figura 3	Boxplot para la variable “número de tubérculos sanos”. Q1, mediana, Q3, dispersión de los datos y valores atípicos.....	29
Figura 4	Boxplot para la variable “peso de tubérculos sanos”. Q1, mediana, Q3, dispersión de los datos y valores atípicos.....	29
Figura 5	Gráfico correspondiente a la diferencia en el número de tubérculos obtenidos entre el tratamiento “inducción” y “control” para cada variedad de papa.....	31

LISTADO DE ANEXOS

		Pág.
Anexo 1	Listado de abreviaturas de variedades de papa utilizadas en los experimentos.....	43
Anexo 2	Comandos y salida en R para el análisis de varianza, test de Shapiro Wilk y test de Kruskal Wallis, correspondiente al análisis de la variable no. de huevos del experimento denominado "preferencia de oviposición".....	44
Anexo 3	Comando y salida en R correspondiente a la implementación del test de Tukey para datos no paramétricos correspondientes a la variable no. De huevos del experimento denominado "preferencia de oviposición".....	45
Anexo 4	Comandos y salida en R para el MANOVA implementado para el análisis de las variables "número de tubérculos sanos" y "peso de los tubérculos ", correspondientes al experimento denominado "tolerancia".....	47
Anexo 5	Comando y salida en R correspondiente a la implementación del test de Mardia para verificación del supuesto de normalidad de los residuales en el MANOVA implementado para análisis de las variables "no. de tubérculos sanos" y "peso de los tubérculos".....	47
Anexo 6	Comandos y salida en R correspondiente al perMANOVA implementado para análisis de las variables "no. de tubérculos sanos" y "peso de los tubérculos".....	48
Anexo 7	Comandos y salida en R de la implementación de los modelos: lineal generalizado con distribución Poisson, conteos inflados con ceros y test de Vuong, para el análisis de la variable "número de individuos de T. solanivora desarrollados" correspondiente al experimento denominado "resistencia".....	49
Anexo 8	Resultados del análisis de varianza, test de Shapiro Wilk y ANOVA robusta para el análisis de la variable "diferencia en el peso de las larvas de <i>S. frugiperda</i> " correspondiente al bioensayo con <i>Spodoptera frugiperda</i>	53

GLOSARIO

Palabra / concepto	Definición
Artrópodo	Los artrópodos (Arthropoda, del griego <i>árthron</i> que significa articulación y <i>poús</i> que significa pie) constituye el filo más numeroso y diverso del reino animal. El término incluye a animales invertebrados dotados de un exoesqueleto externo y apéndices articulados, entre otros insectos, arácnidos, crustáceos (Borror, Triplehorn, & Johnson , 1989).
Defensas constitutivas	Son defensas correspondientes a la protección permanente de las especies vegetales e incluye la mayoría de las protecciones mecánicas externas como las espinas, tricomas y también una gran variedad de compuestos químicos que reducen la digestibilidad de los tejidos vegetales o son venenosos para los herbívoros (Granados Sánchez, Puga, & Barrera Escorcía, 2008).
Defensas inducidas	Son defensas que pueden ser desarrolladas en las plantas superiores o inducidas por daños de herbívoros o por enfermedades (Granados Sánchez, Puga, & Barrera Escorcía, 2008).
Eclosión	La eclosión es el momento en que la cría de diversas especies de animales o vegetales comienzan a liberarse de su huevo o capullo, una vez que han alcanzado su máximo nivel de desarrollo y están listos para nacer (Cabrera Peña, Rojas, Galeano, & Meza, 1995)
Enemigos naturales	Organismos que viven a expensas de otro en su área de origen y que puede contribuir a limitar la población de ese organismo. Incluye parasitoides, parásitos, depredadores, organismos fitófagos y patógenos (FAO, 2006).
Entomopatógeno	Son microorganismos que producen enfermedades a los insectos. Estos organismos penetran a la especie plaga a través del tubo digestivo o del tegumento dando lugar a la expresión de la enfermedad que causa la muerte del hospedante. Dentro de los agentes entomopatógenos se incluyen bacterias, hongos, virus, nematodos y protozoos fundamentalmente (Bailey, y otros, 2010).
Exuvia	La exuvia es la cutícula o cubierta exterior (exoesqueleto), abandonada por los artrópodos (insectos, crustáceos o arácnidos tras la muda (Grimaldi & Engel, 2005).
Foliolo	En anatomía vegetal se denomina foliolo a cada pieza separada en que puede encontrarse dividido el limbo o la hoja de una planta. Las hojas pueden ser simples o compuestas; una hoja simple tiene un solo limbo y en una hoja compuesta hay dos o más limbos denominados foliolos, que se unen a un eje común o raquis (Esau, 1985)
Herbívoro – herbivoría	La herbivoría es el consumo de material vegetal por animales y los herbívoros son animales adaptados a comer plantas. Al igual que en las interacciones depredador – presa, esta interacción conduce a

	adaptaciones tanto en el herbívoro como en la especie vegetal hospedante. Algunos herbívoros solo consumen hojas, mientras otros consumen corteza, savia raíces, semillas, frutos, flores, néctar o polen (Granados Sánchez, Puga, & Barrera Escorcía, 2008).
Instar / estadio	Corresponde a cada una de las etapas de desarrollo de los artrópodos, como los insectos entre cada muda, hasta que se alcanza la madurez sexual (Allaby, 2006).
Microorganismo	Un protozoo, hongo, bacteria, virus u otra entidad biótica microscópica capaz de reproducirse (FAO, 2006).
Microorganismo fitopatógeno	Se denomina fitopatógeno a un organismo, en general microorganismo, que causa enfermedades en las plantas por medio de disturbios en el metabolismo celular causado por la secreción de enzimas, toxinas, fitoreguladores y otras sustancias y además por la absorción de nutrientes de la célula para su propio crecimiento (Agrios, 1997).
Plaga	Cualquier especie, raza o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales (FAO, 2006).
Resistencia química de las plantas a herbívoros	Cualquier característica de una planta (física o química) que le evita ser consumida (Calderón Rodríguez, 2009).
<i>Solanum tuberosum</i> grupo Andígena	Las papas del grupo Andígena (<i>andigenum</i>) constituyen un grupo importante de cultivares nativos seleccionados por agricultores andinos, que se cultiva a lo largo de los Andes en alturas que varían entre 2000 y 4000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) y forman tubérculos en condiciones de día corto (conocidas como papa de año) (Rodríguez, 2009)
<i>Solanum tuberosum</i> grupo Phureja	Las papas del grupo Phureja constituyen el grupo de variedades conocidas como papas criollas. El nombre Phureja o fureja, deriva del Aymara y significa precocidad, considerando que los tubérculos carecen de dormancia y brotan fácilmente, lo que asegura ciclos productivos precoces a diferencia de las especies del grupo Andígena (Rodríguez, 2009)
Testigo absoluto	Corresponde a la muestra poblacional en la cual no se implementa ningún tipo de tratamiento. También se conoce como tratamiento control.
Tolerancia de las plantas a los herbívoros	Habilidad de la planta para minimizar el daño causado por la herbivoría (Granados Sánchez, Puga, & Barrera Escorcía, 2008).

RESUMEN.

La polilla guatemalteca de la papa *Tecia solanivora* Povolný (Lepidoptera: Gelechiidae) es la principal especie plaga del cultivo de papa en Colombia. En la actualidad el Programa de Investigación en Papa de la Universidad Nacional de Colombia y otros entes investigativos del país, tales como Corpoica, han desarrollado variedades de papa (*Solanum tuberosum* Grupo Andígena y Grupo Phureja.) de uso comercial con características de resistencia y tolerancia frente al ataque de artrópodos plaga y enfermedades. Sin embargo aún se desconocía si las principales variedades de papa desarrolladas y comercializadas en nuestro país poseen características de resistencia y/o tolerancia a la herbivoría causada por la especie *T. solanivora*.

Por tal motivo en el marco de desarrollo del proyecto “*Sustainable pest management and yield increase strategies through ecological, genetic and economic analysis*” se establecieron una serie de experimentos en los cuales se evaluaron variables cuantitativas (preferencia de oviposición, producción de tubérculos y desarrollo de la plaga, expresado como el número de pupas de *T. solanivora*) con el fin de identificar las variedades de papa con características de resistencia o tolerancia al ataque de la plaga en mención. Para el análisis de datos se utilizaron herramientas estadísticas tales como análisis de varianza simples y análisis no paramétricos como el test de Kruskal Wallis y el análisis multivariado por permutaciones y la implementación del modelo para conteos inflados con ceros; todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa estadístico R.

A partir del análisis estadístico de los datos fue posible evidenciar que, de las 20 variedades de papa seleccionadas para la ejecución del proyecto, existen variedades del grupo Andígena y Phureja que poseen características de resistencia constitutiva y de tolerancia, frente al ataque de la polilla guatemalteca de la papa.

ABSTRACT

The Guatemalan potato moth, *Tecia solanivora* Povolný (Lepidoptera: Gelechiidae) is the most important potato pest in Colombia. At present the Potato Research Program from the Universidad Nacional de Colombia and other research groups of the country, such as Corpoica, have developed varieties of potato (*Solanum tuberosum* Andigena group and Phureja group) for commercial use with resistance and tolerance characteristics against arthropod pests and diseases. However it is still unknown if the main varieties developed and marketed in our country have characteristics of resistance and / or tolerance to herbivory caused by the species *T. solanivora*.

Therefore within the framework of the project “Sustainable pest management and yield increase strategies through ecological, genetic and economic analysis” a series of experiments in which quantitative variables (oviposition preference, tubers production and pest development, expressed as the number of pupae of *T. solanivora*) in order to identify potato varieties with characteristics of resistance or tolerance to pest attack in question. For statistical data analysis we used tools such as analysis of variance and non-parametric simple as the Kruskal – Wallis Test, permutations multivariate analysis and implementation of the zero inflated model; All statistical analyzes were performed using the statistical software R.

From statistical analysis of data was possible to evidence that, of the 20 potato varieties selected for the project, there are varieties of Andigena and Phureja group that possess characteristics of constitutive resistance and of tolerance, against Guatemalan potato moth.

1. INTRODUCCIÓN

A la luz de una población mundial en aumento, crece la preocupación por el riesgo de la escasez de alimentos y la constante demanda de los mismos, lo cual ha llevado a centrar los esfuerzos investigativos en la búsqueda del incremento de la productividad y la reducción de plagas en los cultivos; sin embargo la presencia de artrópodos plaga sigue reduciendo en un promedio del 15 % la producción en los sistemas agrícolas a nivel mundial (Pimentel, 1991).

A pesar de los efectos negativos de la herbívora, recientes investigaciones sugieren que la comprensión de los mecanismos por los cuales las plantas enfrentan este tipo de ataques puede proporcionar nuevas herramientas para el desarrollo de programas de mejoramiento genético y aumento de la productividad por unidad de superficie (Richards, 2000).

En Colombia y en el sistema productivo de la papa, la polilla guatemalteca, *Tecia solanivora* (Lepidoptera: Gelechiidae) es una de las principales especies de insectos plaga que afectan a este cultivo, por lo que se han adelantado estudios sobre el efecto que tiene la alimentación de las larvas sobre la producción comercial de tubérculos de la variedad de papa "Pastusa Suprema"(Solanaceae) (Poveda, Gómez, & Kessler, 2010); los resultados obtenidos permitieron evidenciar que las plantas de papa cuyos tubérculos fueron levemente infestados con larvas de la polilla aumentaron significativamente su rendimiento en comparación con plantas donde no se indujo ningún tipo de daño. Estos resultados sugieren que, esta variedad comercial, posee atributos de tolerancia y sobrecompensación frente al ataque de la polilla guatemalteca de la papa; sin embargo este experimento no ha sido replicado para las restantes variedades de papa que se comercializan en nuestro país, por lo que se desconocen las propiedades de defensa que han desarrollado frente al ataque de plagas.

Por tal motivo, la pregunta de investigación que enmarca la presente propuesta investigativa, es: ¿Cuál de las 20 variedades colombianas de papa comercial expresan características de tolerancia y resistencia frente al ataque de la polilla guatemalteca de la papa *Tecia solanivora* Povolný (Lepidoptera: Gelechiidae)?

1.1 El sistema productivo de papa en Colombia:

La papa es una especie vegetal del género *Solanum* perteneciente a la familia Solanaceae. En la actualidad es uno de los cuatro alimentos más importantes en el mundo junto al maíz, el trigo y el arroz, por lo que se constituye en el principal alimento de origen no cereal para la humanidad. La FAO (2010) reporta un área cultivada mundial de 18.192.405 hectáreas y una producción de 314.407.107 toneladas para el año 2008. El Centro Internacional de la Papa reporta más de 4000 variedades comestibles de papa, más de 4300 variedades nativas y unas 180 especies silvestres de papa en el mundo. Se cultiva en unos 100 países en alturas comprendidas entre 0 y 4700 msnm, en zonas tropicales, intertropicales y zonas templadas.

La papa es el productor de origen agrícola de mayor consumo *per cápita* aparente en el país (cerca de 62 Kg / año), especialmente de la población de estratos socio económicos menos favorecidos, por tratarse de una fuente de carbohidratos de fácil acceso y bajo precio. Se cultiva durante todo el año en cerca de 133.865 hectáreas, dispersas en unos 250 municipios de la zona fría y muy fría de la región Andina. La papa en Colombia tiene un rango potencial de adaptación entre 1500 y 4000 msnm; comercialmente se cultiva entre 200 y 3500 msnm; alturas superiores o inferiores se consideran como marginales (FEDEPAPA, 2015).

De la producción nacional de papa, los departamentos que tienen mayor participación son Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia de la producción nacional respectivamente, estos son los departamentos donde tradicionalmente se siembra papa en el país, concentrando en promedio un 90% de la producción. A pesar de existir más de 30 variedades de papa, el 90% de la producción se concentra en las variedades Diacol Capiro, Parda Pastusa y Pastusa Suprema (SIC, 2011).

En la actualidad en Colombia se han liberado más de 20 variedades de papa de año y papa criolla, algunas de las cuales han sido desarrolladas por el Programa de Investigación en papa de la Universidad Nacional de Colombia. Estas variedades han sido seleccionadas por investigadores y productores por sus características de resistencia a la enfermedad causada por el microorganismo patógeno *Phytophthora infestans* (Mont.) De Bary, especie plaga que causa la enfermedad denominada “gota de la papa”; y por características de productividad (rendimiento) y calidad industrial. Sin embargo a la fecha, se desconocen otras características como la resistencia o tolerancia que pueden tener frente al ataque de la polilla guatemalteca de la papa, lo cual es una herramienta fundamental para el desarrollo de programas de mejoramiento genético y como herramienta alternativa al uso de plaguicidas químicos para el manejo de la plaga.

1.2 La Polilla Guatemalteca de la papa *Tecia solanivora* Povolný (Lepidoptera: Gelechiidae)

La polilla guatemalteca de la papa, fue descrita por Povolný en 1973 y fue reportada como plaga de importancia económica de la papa en Guatemala, Costa Rica y otros países de Centroamérica. En Colombia fue registrada por primera vez en 1985 en cultivos de papa de Chitagá (Norte de Santander) donde las pérdidas ocasionadas en campo y almacén superaron el 50 % de la producción a finales de la década de los 80, posteriormente se propagó a Boyacá, Cundinamarca y Antioquia, en donde se reportaron pérdidas hasta del 100 % (Arias, 1996)

En la actualidad, la polilla guatemalteca se reconoce como la plaga entomológica más dañina en la mayoría de las zonas paperas de Colombia. Su ataque causa grandes pérdidas, las cuales se atribuyen, no sólo al deterioro de la apariencia del tubérculo que reduce su valor comercial y los ingresos de los cultivadores, sino al hecho que los tubérculos severamente afectados no se pueden utilizar para semilla ni para consumo humano o animal (Corpoica, Fedepapa, Ica, & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 1998).

La polilla guatemalteca de la papa es un insecto del orden Lepidoptera, de la familia Gelechiidae. Posee metamorfosis completa, es decir que pasa por los estados de huevo, larva, pupa y adulto (Rincón & López, 2004). Al emerger de los huevos las larvas inician su fase de migración hacia los tubérculos, dejando un orificio casi imperceptible al entrar, las larvas consumen el tubérculo formando galerías y dejando depositadas allí sus heces, de tal forma que la profundidad de la galería se incrementa a medida que crece y aumenta su densidad. Los adultos son activos durante la noche y permanecen ocultos de día, estas características la hacen imperceptible durante su ingreso y establecimiento en lotes de cultivo y bodegas de almacenamiento, lo que dificulta su monitoreo y manejo (López - Avila, 1996).

Una de las mayores dificultades para el manejo de la polilla guatemalteca de la papa es el corto tiempo de exposición de las larvas al ambiente. En el campo los huevos son depositados sobre la superficie del suelo cerca de la base del tallo de las plantas de papa. Cuando las larvas eclosionan, estas se introducen rápidamente en el suelo y se dirigen hacia los tubérculos de la planta. Una vez las larvas encuentran el tubérculo, penetran en él formando galerías en donde van dejando las exuvias y excrementos que favorecen el desarrollo de patógenos secundarios. Dentro del tubérculo las larvas se desarrollan protegidas del ambiente y de agentes potenciales de control, como insecticidas, enemigos naturales o microorganismos entomopatógenos (Soriano, 2000).

1.3 La defensa de las plantas frente a la herbivoría:

Todos los organismos vivos, en cualquier ambiente, interactúan con otros; estas interacciones pueden ser definidas como mutualismo o antagonismo (Adler & Irwin, 2005). La herbivoría es definida como una interacción antagónica donde los herbívoros imponen un efecto negativo sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo de la planta hospedera (Delphia, De Moraes, Stephenson, & Mescher, 2009). En respuesta las plantas han desarrollado estrategias para enfrentar el efecto negativo que los herbívoros tienen sobre ellas; entre las principales estrategias que han sido identificadas están la resistencia y la tolerancia (Kessler & Baldwin, 2002; Weining, Stinchcombe, & Schmitt, 2003; Nuñez - Farfan, Fornoni, & Valverde, 2007).

Las plantas continuamente están perdiendo recursos por efecto de la herbivoría; la resistencia química tiene como función la reducción de esa pérdida, por disminución o evasión del ataque de los herbívoros (Calderón Rodríguez, 2009). Los rasgos de resistencia pueden ser de tipo constitutivo o inducido y afectan directamente el desarrollo de los herbívoros; algunos mecanismos de resistencia incluyen la producción de defensas químicas o físicas para afectar directamente el desarrollo de los herbívoros (Kessler & Baldwin, 2002; Nuñez - Farfan, Fornoni, & Valverde, 2007). Las defensas químicas incluyen la producción de metabolitos secundarios de las plantas, mientras las defensas físicas son expresadas a través de tricomas o espinas presentes en diferentes partes de las mismas (Strauss, Watson, & Allen, 2003).

La tolerancia de una planta a un herbívoro solo puede ser evidenciada cuando el herbívoro ataca a su hospedero, es decir se define como un rasgo inducido que le permite a la planta compensar el efecto negativo causado por el herbívoro que se alimenta de ella (Karbon &

Baldwin, 1997; Strauss & Agrawal, 1999; Nuñez - Farfan, Fornoni, & Valverde, 2007). Uno de los ejemplos de tolerancia que se presenta en la naturaleza se expresa en aquellas plantas que tienen la capacidad de sobrecompensar el daño realizado por un herbívoro; por definición la sobrecompensación ocurre cuando las plantas que han sufrido algún tipo de daño por la herbivoría tienen una mayor capacidad reproductiva en comparación con aquellas que no han sufrido ninguna lesión (Strauss & Agrawal, 1999).

Por tal motivo, el grupo de investigación en Manejo Integrado de Plagas de la Universidad Nacional de Colombia, en trabajo conjunto con la Fundación Biodiversa Colombia y bajo la coordinación del Departamento de Entomología de la Universidad de Cornell, implementó una serie de experimentos para identificar las características de resistencia o tolerancia de 20 variedades de papa.

En total se desarrollaron tres experimentos denominados “preferencia de oviposición”, “tolerancia” y “resistencia”; para cada uno de ellos se establecieron las correspondientes variables explicativas y variables respuesta de acuerdo a cada experimento. Para el análisis de los datos se aplicaron herramientas estadísticas tales como el análisis de varianza simple (ANOVA), el test de Kruskal Wallis, el análisis multivariado de la varianza (MANOVA) y su correspondiente análisis no paramétrico denominado ANOVA por permutaciones (PerMANOVA). Además se implementó el modelo lineal generalizado de Poisson y el modelo para conteos inflados con ceros, para el análisis de variables correspondientes a conteos. La naturaleza de este estudio es de tipo inferencial.

2. OBJETIVO GENERAL

Identificar, de las 20 variedades colombianas de papa comercial utilizadas en el experimento, cuales expresan características de tolerancia y resistencia frente al ataque de la polilla guatemalteca de la papa *Tecia solanivora*.

2.1 Objetivos específicos

- Determinar, a partir de la implementación de un análisis de varianza simple, si existen diferencias significativas frente a la oviposición de la polilla guatemalteca de la papa y las 20 variedades de papa seleccionadas para el experimento.
- Evaluar si existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos control (testigo absoluto) e inducción (daño causado por herbivoría), frente a las variables de respuesta para los experimentos denominados “tolerancia” y “resistencia”, en las 20 variedades de papa seleccionadas para el experimento.
- A partir de los resultados obtenidos del análisis estadístico de los datos, seleccionar las variedades de papa con características de resistencia y tolerancia, como parte de una estrategia de manejo integrado de la plaga.

3. METODOLOGÍA

Con el fin de identificar las características de resistencia o tolerancia de 20 variedades comerciales de papa frente al ataque de la polilla guatemalteca y en el marco del proyecto “*Sustainable pest management and yield increase strategies through ecological, genetic and economic analysis*” se realizaron una serie de experimentos bajo condiciones controladas, cuyo objetivo principal fue analizar el desarrollo de las poblaciones del insecto plaga sobre cada uno de los cultivares de papa seleccionados y en cada tratamiento establecido; para tal fin se establecieron los siguientes experimentos y sus correspondientes variables categóricas y de respuesta:

Tabla 1. Variables categóricas y variables respuesta definidas para cada experimento.		
Experimento	Variable (s) categórica (s)	Variable (s) respuesta (s)
No. 1 preferencia de oviposición	<ul style="list-style-type: none"> • Variedades de papa utilizadas en el experimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de huevos depositados en cada variedad de papa
No. 2 tolerancia	<ul style="list-style-type: none"> • Factor 1: Variedades de papa utilizadas en el experimento • Factor 2: Tratamiento control e inducción 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de tubérculos sanos producidos • Peso de los tubérculos sanos • Diferencia en el número de tubérculos sanos producidos
No. 3 resistencia	<ul style="list-style-type: none"> • Factor 1: Variedades de papa utilizadas en el experimento • Factor 2: Tratamiento control e inducción 	<ul style="list-style-type: none"> • número de individuos que completaron su desarrollo para cada variedad y en cada tratamiento.

3.1 Experimento no. 1 preferencia de oviposición (como medida de resistencia de las plantas ante la herbivoría):

Para evidenciar si los adultos de la polilla guatemalteca de la papa *T. solanivora*, prefieren depositar sus huevos sobre alguna de las 20 variedades utilizadas para el experimento, se procedió al montaje de un ensayo en el cual se utilizaron plantas jóvenes de cada una de las variedades de papa (se utilizaron plantas en etapa temprana de floración, momento en el cual se emiten las principales señales químicas para la oviposición de *T. solanivora*); al interior de cada unidad experimental, conformada por una planta, se liberaron tres parejas de adultos de la especie *T. solanivora*. Para asegurar que las polillas permanecieran cerca de la planta, cada una de estas fue cubierta por una bolsa de tela que permitió la transpiración y fotosíntesis al interior de la unidad experimental (fig.1).

Posterior a 10 días de liberadas las polillas, cada planta fue descubierta cuidadosamente y se procedió a contabilizar el número de huevos depositados en cada planta; durante el desarrollo de esta fase experimental se establecieron 15 réplicas para cada variedad de papa.

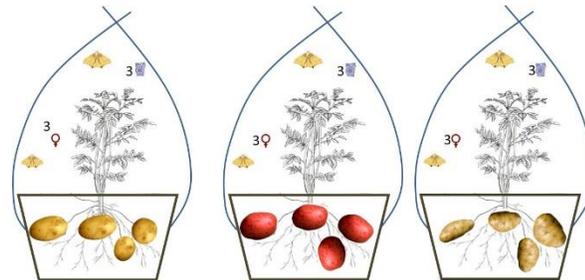


Fig.1. Metodología implementada para el desarrollo expuesto en el experimento no. 1. (Fuente: Poveda, K. 2013)

Para el análisis estadístico de los datos, se implementó un análisis de varianza simple, en el cual el factor correspondió a las 20 variedades de papa, y la variable respuesta, de tipo cuantitativo, fue expresada como el número de huevos encontrados en cada unidad experimental. Con el fin de corroborar que los residuales cumplieren el supuesto de normalidad, se implementó el test de Shapiro – Wilk y de acuerdo al resultado obtenido por la prueba se procedió a la implementación del test de Kruskal – Wallis para datos no paramétricos, en caso de no cumplirse el supuesto de normalidad de los residuales.

3.1.1 Análisis de Varianza Simple (ANOVA):

El análisis de varianza (ANOVA; Analysis Of Variance, según sus siglas en inglés) o análisis simple de la varianza tiene como objetivo determinar el efecto de una variable nominal u ordinal sobre una variable métrica; se aplica para contrastar la hipótesis nula (H_0) de que las muestras proceden de subpoblaciones o grupos en las que la media de la variable dependiente es la misma, o la hipótesis alterna (H_a) que no existen diferencias significativas entre las medias observadas. El análisis de varianza se basa en que la variabilidad total de la muestra puede descomponerse en la variabilidad debida a la diferencia entre grupos y la debida a la diferencia dentro de los grupos. A partir de este supuesto, el análisis de varianza proporciona, para contrastar la H_0 de igualdad de medias entre los grupos, el estadístico F (el cual compara la variabilidad debida a las diferencias entre grupos con la debida a las diferencias dentro de los grupos). Cuanto mayor sea el valor del estadístico F y menor su significancia, más probabilidad de que existan diferencias entre los grupos. En consecuencia si el p-valor asociado al estadístico es menor que el nivel de significancia se rechazará la hipótesis nula de igualdad de medias (Rodríguez Jaime & Mora Catalá, 2001).

Sin embargo los supuestos estadísticos paramétricos que han de cumplir los datos para que sea aplicable el análisis de varianza son tres: deben proceder de muestras aleatorias simples, las varianzas de las subpoblaciones deben ser iguales y debe existir normalidad de los datos.

3.1.2 Test de Shapiro –Wilk:

La normalidad es uno de los supuestos estadísticos más comunes implementados en el desarrollo y uso de procedimientos estadísticos; la normalidad de una distribución de datos subyacente tiene un efecto considerable sobre las propiedades de estimación o procedimientos inferenciales utilizados en el análisis de datos (Namhyun, 2010). Uno de los test mayormente utilizados para estimación de la normalidad es el test del Shapiro – Wilk (1965); en el test de Shapiro – Wilk se plantea como hipótesis nula que una muestra x_1, \dots, x_n , proviene de una población normalmente distribuida. El estadístico del test se expresa como:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

x_i : Corresponde al número que ocupa la i -ésima posición de la muestra.

\bar{x} : Corresponde a la media muestral.

Siendo la hipótesis nula correspondiente a que la población está distribuida normalmente, si el p-valor es menor a alfa, entonces la hipótesis nula es rechazada y se concluye que los datos no vienen de una distribución normal. Si el p-valor es mayor a alfa, no se rechaza la hipótesis y se concluye que los datos siguen una distribución normal.

3.1.3 Test de Kruskal Wallis:

El test de Kruskal Wallis y su equivalente para dos muestras, denominado test de Mann – Whitney U, son probablemente las pruebas no paramétricas más ampliamente utilizadas en el estudio de ciencias. El test de Kruskal Wallis es un método no paramétrico, el cual no asume normalidad de los datos y utilizado para la comparación de dos o más muestras; la hipótesis nula y alternativa del test de Kruskal Wallis son de naturaleza distinta a las planteadas para el análisis de varianza: la hipótesis nula plantea la homogeneidad estocástica, siendo la heterogeneidad estocástica la planteada en la hipótesis alterna (Ruxton & Beauchamp, 2008).

Este contraste permite decidir si puede aceptarse la hipótesis de que k muestras independientes proceden de la misma población o de poblaciones idénticas con la misma mediana. Sean n_1, n_2, \dots, n_k los tamaños de cada una de las muestras y n el total de observaciones. Para el cálculo del estadístico de la prueba del test de Kruskal Wallis, se ordenan las n observaciones de menor a mayor y se les asignan rangos desde 1 hasta n .

A continuación se obtiene la suma de los rangos correspondientes a los elementos de cada muestra R_j y se halla el rango promedio. Si se cumple la hipótesis nula, es de esperar que el rango promedio sea aproximadamente igual a k muestras; cuando dichos promedios sean muy diferentes es un indicio de que se rechaza la H_0 .

3.2 Experimento no. 2 tolerancia:

Para analizar la tolerancia como una variable respuesta, se estableció un experimento en el cual se indujo artificialmente el daño causado por la polilla en cada una de las 20 variedades de papa seleccionadas; se estableció un tratamiento control, en el cual no se indujo ningún daño por herbivoría y un tratamiento denominado “inducción”, en donde se reprodujo el daño causado por *T. solanivora*.

Puesto que el daño evidenciado por la especie plaga es causado por las larvas, el tratamiento de inducción consistió en seleccionar aleatoriamente un tubérculo de cada planta utilizada en el experimento y colocar cuidadosamente un total de 10 larvas neonatas de *T. solanivora*. Se establecieron un total de 16 réplicas para cada variedad y cada tratamiento.

Como una de las variables respuesta, asociadas a la tolerancia, se estimó el rendimiento expresado como “número de tubérculos producidos por la planta” y “el peso total de los mismos”; El análisis estadístico consistió en un análisis de varianza de dos vías (factorial) multivariado, teniendo como variables categóricas explicativas la variedad y los tratamientos anteriormente descritos (control e inducción). Con el fin de corroborar que los residuales cumplieren los supuestos de normalidad se implementó el test de Mardia para análisis multivariados. A partir del resultado obtenido se procedió a la implementación del Análisis de Varianza por permutaciones para diseños multivariados no paramétricos.

Sin embargo, la tolerancia no se expresa directamente por el rendimiento, o la productividad de las variedades contempladas en el experimento, sino por la diferencia entre el rendimiento obtenido entre el tratamiento “control” y el tratamiento “inducción”, para cada una de estas variedades. Para establecer si existe diferencia entre las medias de los dos tratamientos se implementó la prueba T de Student para comparación de medias, asumiendo varianzas diferentes. A partir del p-valor obtenido para la comparación de las medias de cada tratamiento, y para cada variedad, se estableció si existieron o no, diferencias en el rendimiento entre tratamientos, que pueda ser expresado como una característica de tolerancia de las variedades de papa.

3.2.1 Análisis Multivariado de varianza (MANOVA)

El análisis multivariado de la varianza es una extensión del análisis de varianza (ANOVA) en donde se tiene en cuenta más de una variable de criterio o dependiente. Es una técnica de dependencia que analiza el comportamiento de un conjunto de variables numéricas dependientes de las subpoblaciones o grupos establecidos por la combinación de los valores del conjunto de variables categóricas (factores) independientes. El ANOVA y el MANOVA, como procedimientos de inferencia estadística, se aplican para contrastar la significancia estadística entre grupos. Mientras que en ANOVA la hipótesis nula contrastada es la igualdad de las medias de la variable dependiente entre grupos, en el MANOVA la hipótesis nula contrastada es la igualdad de un conjunto (vector) de medias de las variables dependientes entre los grupos delimitados por los valores de la (s) variable (s) independientes (se contrasta la igualdad de un valor teórico el cual combina las medidas dependientes múltiples dentro de un valor único que maximiza la diferencia entre grupos).

El MANOVA contrasta la hipótesis nula que los vectores de las medias de todos los grupos son iguales y/o provienen de la misma población. Los supuestos estadísticos paramétricos que han de cumplir los datos para que se les pueda aplicar el análisis de varianza son tres: deben proceder de muestras aleatorias simples, debe existir normalidad en la distribución de los datos y las varianzas de las poblaciones deben ser iguales (Rodríguez Jaume & Mora Catalá, 2001).

3.2.2 Test de Mardia

El supuesto de multinormalidad se requiere en la mayoría de los métodos multivariados clásicos. Algunos ejemplos son: el análisis de varianza multivariado, el análisis de discriminante, el análisis de correlación canónica y el análisis de factor de máxima verosímil. Dentro de las pruebas de multinormalidad, las basadas en las medidas de asimetría y kurtosis desarrolladas por Mardia (1970) han sido muy utilizadas por su facilidad y por la indicación de que tipo de alejamiento de la multinormalidad se presenta (Yañez Canal, Jaramillo, & Correa Morales, 1999).

Mardia (1970) propuso algunos test para contrastar si la asimetría y la curtosis multivariantes del conjunto de variables observables permite asumir o no la hipótesis de normalidad. Estos contrastes se construyen a partir de los siguientes medidas muestrales de asimetría y curtosis multivariantes:

$$\text{Asimetría } G_{1,p} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(x_i - \bar{x})' \hat{s}^{-1} (x_j - \bar{x})]^3$$

$$\text{Curtosis } G_{2,p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})' \hat{s}^{-1} (x_i - \bar{x})]^2$$

Donde n representa el número total de observaciones x_i y x_j son vectores columna con los valores de todas las variables observaciones i -ésima y j -ésima, respectivamente, \bar{x} es el correspondiente vector columna de medias muestrales y \hat{s}^{-1} es la inversa de la matriz de varianzas-covarianzas muestral.

Los estadísticos de contraste $z(G_{1,p})$ y $z(G_{2,p})$ obtenidos a partir de $G_{1,p}$ y $G_{2,p}$ se distribuyen asintóticamente según una normal estándar, por lo que su interpretación es semejante a la utilizada para los estadísticos de asimetría y curtosis univariante: $z(G1)$ y $z(G2)$: valores experimentales que en valor absoluto sean mayores que 1.96 permiten rechazar a un nivel de significación del 5% las respectivas hipótesis nulas de distribución multivariante simétrica y mesocúrtica (González, Abad, & Lévy, 2006).

3.2.3 Análisis de varianza por permutaciones (perMANOVA):

Los análisis por permutaciones son especialmente útiles y relevantes para el análisis multivariado, donde los supuestos estadísticos son difíciles de cumplir. PerMANOVA es una técnica de análisis multivariante (sobre medidas de distancia) con varios factores utilizado en diseños balanceados; Aplica análisis por permutaciones sobre las matrices de distancia para obtener el p-valor. Mientras el ANOVA y MANOVA asumen distribuciones normales

de los datos, el análisis de varianza por permutaciones utiliza cualquier medida de distancia que sea apropiado para el análisis de los mismos (Anderson, Cajo, & Braak , 2003).

3.3 Experimento no. 3 resistencia:

A partir del experimento descrito para el estudio de la tolerancia, se seleccionaron tubérculos de cada una de las 20 variedades, los cuales no hubiesen sido afectados por herbivoría (tratamiento control) y tubérculos sanos de plantas donde se implementó el tratamiento de inducción (inducción local e inducción sistémica por herbivoría). Cada tratamiento fue replicado 10 veces y en cada unidad experimental, conformada por un tubérculo, se colocaron 10 larvas de *T. solanivora*; al finalizar el experimento se contabilizó el número de individuos que completaron su desarrollo para cada variedad y en cada tratamiento.

El análisis estadístico de los datos correspondió a una regresión de Poisson (modelo lineal generalizado con distribución de Poisson), sin embargo considerando la cantidad de ceros que conforman la variable respuesta se implementó la metodología de modelos para conteos inflados con ceros y el test de Vuong para la comparación de los dos modelos de ajuste no anidados.

3.3.1 Modelo lineal generalizado de Poisson:

Las variables de conteo o recuento se definen como el número de sucesos o eventos que ocurren en una misma unidad de observación en un intervalo espacial o temporal definido. En los conteos o recuentos, el valor 0 es bastante habitual; A partir de esta definición propuesta por Lindsey (1995b) se derivan dos características principales de una variable de recuento, lo cual lo diferencia de una variable cuantitativa continua, estas son sus naturalezas discreta y no negativa (Figueroa Arboccó, 2005).

El modelo lineal generalizado surge por la necesidad de expresar en forma cuantitativa, relaciones entre conjunto de variables en las que una de ellas se denomina variable respuesta o variable dependiente y las restantes son llamadas covariables, variables explicativas o variables independientes. Un modelo lineal generalizado tiene tres componentes:

- Componente aleatoria: identifica la variable respuesta y su distribución de probabilidad.
- Componente sistemática: especifica las variables explicativas (independientes o predictoras) utilizadas en la función predictora lineal.
- Función link o función de enlace: es una función del valor esperado de Y , $E(Y)$, como una combinación lineal de las variables predictoras (López González & Ruiz Soler, 2011).

Componente aleatoria:

La componente aleatoria de un modelo lineal generalizado consiste en una variable aleatoria Y con observaciones independientes (y_1, \dots, y_N) . En muchas aplicaciones, las observaciones de Y son binarias, y se identifican como éxito y fracaso. Aunque de modo más general, cada Y_i indicaría el número de éxitos de entre un número fijo de ensayos, y se modelaría como una distribución binomial. En otras ocasiones cada observación es un recuento, con lo que se puede asignar a Y una distribución de Poisson o una distribución binomial negativa. Finalmente, si las observaciones son continuas se puede asumir para Y una distribución normal.

Componente sistémica:

La componente sistémica de un modelo lineal generalizado especifica las variables explicativas que entran en forma de efectos fijos en un modelo lineal, es decir las variables x_j se relacionan como:

$$\alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

Esta combinación lineal de variables explicativas se denomina predictor lineal y alternativamente se puede expresar como un vector (n_1, \dots, n_N) tal que:

$$n_i = \sum_j \beta_j x_{ij}$$

Donde x_{ij} es el valor del j -ésimo predictor en el i -ésimo individuo, e $i = 1, \dots, N$. El término independiente α se obtendría con esta notación haciendo que todos los x_{ij} sean igual a 1 para todos los i . En cualquier caso, se pueden considerar variables que están basadas en otras variables como $x^3 = x^1 x^2$ ó $x^3 = x_2^2$, para modelar interacciones entre variables o efectos curvilíneos de x_2 .

Función link o de enlace:

Se denota el valor esperado de Y como $\mu = E(Y)$, entonces, la función link especifica una función $g(\cdot)$ que relaciona μ con el predictor lineal como:

$$g(\mu) = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

Así la función link $g(\cdot)$ relaciona las componentes aleatoria y sistemática. De este modo, para $i=1, \dots, N$,

$$\begin{aligned} \mu_i &= E(Y_i) \\ n_i &= g(\mu_i) = \sum_j \beta_j x_{ij}, \end{aligned}$$

La función g más simple es $g(\mu) = \mu$; esto es la identidad que da lugar al modelo de regresión lineal clásico

$$\mu = E(Y) = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

El modelo de regresión de Poisson (MRP) es el modelo de referencia en estudios de variables de recuento. Es un modelo que resulta especialmente adecuado para modelar valores enteros no negativos cuando la frecuencia de ocurrencia es baja.

La distribución de Poisson fue derivada por Simeon Denis Poisson, quien en 1837 publicó un trabajo de investigación en el que se presentaba una nueva distribución para el cálculo de las probabilidades aplicado al ámbito penal. Poisson encontró que cuando el tamaño de muestra es grande y la posibilidad de ocurrencia de un evento es pequeña, el valor esperado $\mu = np$ tiende a una constante (Figueroa Arboccó, 2005).

La variable respuesta se asume que tiene una distribución de probabilidad Poisson, en la cual la variable aleatoria se define como el número de eventos que ocurren en un intervalo de tiempo, cuya ocurrencia es aleatoria, independiente en el tiempo y con una tasa constante de ocurrencia. La distribución Poisson es usada para modelar eventos por unidad espacial como también por unidad de tiempo; a diferencia del modelo de regresión clásico, la variable respuesta en el modelo de regresión de Poisson es discreta, con valores enteros positivos y se comporta como una distribución de probabilidades Poisson (Figueroa Arboccó, 2005).

El MRP se deriva a partir de la función de enlace de los MLG, donde se parametriza la relación entre la media μ y las variables predictoras. La idea básica para este modelo es que la información de las variables predictoras (x) están relacionadas a la razón o susceptibilidad de la respuesta al incremento o decrecimiento de los conteos (y)

El MRP tiene la siguiente forma:

$$\log \mu_i = \eta_i = \beta^T X_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

La Equidispersión: Se asume que, debido a la naturaleza de la distribución de Poisson, $Var(Y) = \vartheta^2 E(Y)$, donde ϑ^2 es el parámetro de dispersión y se asume constante. Es decir la distribución de Poisson se caracteriza por la equidispersión, esto es $Var(Y) = E(Y)$. Sin embargo un problema que se da con cierta frecuencia en este modelo es que la relación media – varianza no es equitativa. Las desviaciones en relación a la equidispersión pueden resultar en:

- Sobredispersión: si $Var(Y) > E(Y)$, es decir si $\vartheta^2 > 1$
- Infradispersión o subdispersión: $Var(Y) < E(Y)$, es decir si $\vartheta^2 < 1$

En la práctica, puede ocurrir que se presente subdispersión o sobredispersión, pero es esta última la que aparece con mayor frecuencia (Figueroa Arboccó, 2005).

Cuando la variable respuesta es un conteo los datos observados se pueden modelar estadísticamente con distribuciones discretas como la Poisson y la binomial negativa de acuerdo a la estimación del cumplimiento del supuesto de equidispersión. Sin embargo es común que el número de ceros observados en la variable respuesta exceda la frecuencia que se espera observar bajo la distribución que se ajusta; en este caso se dice que los datos presentan exceso de ceros o están inflados con ceros (Velasco Vázquez & Suarez Cerrilo, 2008); a partir de esta justificación y considerando las características de la variable respuesta del experimento denominado “resistencia” se implementó el modelo para conteos inflados con ceros para el análisis de la variable denominada no. De individuos de *T. solanivora* desarrollados.

3.3.2 Modelo para conteos inflados con ceros:

De manera particular, los modelos para datos de conteo con cero-inflado le confieren mayor peso a la probabilidad de que la variable de conteo sea igual a cero, al incorporar un mecanismo que divide a los sujetos con valor en cero y cuya probabilidad es $p = x_{1i}\beta_1$ e individuos con valor positivo y probabilidad $1 - p = x_{1i}\beta_1$. En consecuencia, la función de probabilidad para un modelo de regresión Poisson cero – inflado es una mezcla de un modelo Poisson estándar y una distribución con función de masa concentrada en cero (Salinas Rodríguez, Manrique Espinoza, & Sosa Rubí, 2009).

Para desarrollar modelos estadísticos que modelen adecuadamente el exceso de ceros es importante tener en cuenta los mecanismos que originan los ceros. En este sentido, se debe determinar si se trata de ceros estructurales o muestrales (Salinas Rodríguez, Manrique Espinoza, & Sosa Rubí, 2009).

Supóngase que se observa el número de lesiones en plantas. Una planta podría no tener lesiones porque es resistente al ataque del herbívoro o la enfermedad que ocasiona la lesión; para esta planta se observarían cero lesiones, lo que corresponde a un cero estructural. Por otra parte si una planta es vulnerable a la enfermedad pero al momento de la observación no está afectada, entonces este dato corresponderá a un cero muestral (Velasco Vázquez & Suarez Cerrilo, 2008).

En los modelos de regresión para datos inflados con ceros se mezcla una distribución degenerada en el cero con una distribución discreta no degenerada. La estructura de la regresión se construye a través de la media de la distribución no degenerada y posiblemente a través de mezclar las probabilidades.

Sea $Y = (Y_1, \dots, Y_n)^T$ el vector de la variable respuesta. El modelo de regresión para conteos inflados con ceros (PIC) supone que las Y_i son independientes con la siguiente distribución:

$$Y_i = 0 \text{ con probabilidad } p_i,$$

$$Y_i \sim \text{Poisson}(\lambda_i) \text{ con probabilidad } 1 - p_i$$

De tal manera que la función de masa de probabilidad de Y_i es:

$$P(Y_i = y) = \begin{cases} p_i + (1-p_i)e^{-\lambda_i}, & \text{para } y=0 \\ (1-p_i)\frac{e^{-\lambda_i}\lambda_i^y}{y!} & \text{para } y=1,2,\dots \end{cases}$$

Denotando lo anterior, $Y_i \sim \text{PIC}(p_i, \lambda_i)$. La variable respuesta se modela mediante los parámetros del modelo $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)^T$ y $p = (p_1, \dots, p_n)^T$.

3.3.3 Test de Vuong:

La prueba de Vuong es una extensión de la prueba de razón de verosimilitud para la evaluación de modelos no anidados. El objetivo de la prueba es seleccionar el modelo más cercano a la distribución condicional verdadera; la hipótesis nula plantea que los dos modelos son equivalentes:

$$H_0 = E_0[l_f(\hat{\alpha}) - l_g(\hat{\beta})] = 0$$

El estadístico de prueba del test está dado por:

$$LR_{NA} = \frac{\frac{1}{\sqrt{n}} \left[l_f(\tilde{\alpha}) - l_g(\tilde{\beta}) \right]}{\omega}$$

Donde:

$$\omega^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [l_f(y_i|x_i, \hat{\alpha}) - l_g(y_i|x_i, \hat{\beta})]^2 - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_f(y_i|x_i, \hat{\alpha}) - l_g(y_i|x_i, \hat{\beta}) \right]^2$$

Bajo la hipótesis nula, el estadístico LR_{NA} converge en una distribución normal. En cuanto a la selección del modelo sea c el valor crítico para el nivel de significancia. Si el estadístico $LR_{NA} > c$, se rechaza la hipótesis nula de igualdad entre modelos, y se selecciona el modelo f en lugar del modelo g . Si $|LR_{NA}| < c$, no se puede discriminar entre ambos modelos, de modo que no se rechaza la hipótesis nula (Vives Brosa, 2002).

3.3.4 Bioensayo sobre *Spodoptera frugiperda* (J.E Smith) (Lepidoptera: Noctuidae):

Como medida alterna de la resistencia generada por las diferentes variedades de papa evaluadas, se realizó además un experimento en el cual se evaluó el desarrollo de la especie *Spodoptera frugiperda* J.E Smith (Lepidoptera: Noctuidae; especie polífaga que se alimenta de hojas y tallos de diversas especies de plantas) alimentadas con folíolos de cada una de las variedades de papa criolla incluidas en el experimento. Para tal fin se utilizaron larvas de segundo instar de *S. frugiperda* las cuales fueron alimentadas con folíolos de papa

de las variedades “Criolla Paisa”, “Criolla Galeras”, “Criolla Guaneña” “Criolla Latina” y “Criolla Colombia”, hasta completar su desarrollo; el peso inicial de cada individuo y el peso al final del experimento de cada larva fue registrado. Como variable respuesta se utilizó la diferencia, expresada como el peso ganado por el individuo posterior a alimentarse de los folíolos.

El análisis estadístico de los datos correspondió a un análisis de varianza de la variable respuesta denominada “diferencia” (diferencia entre el peso inicial y peso final de la larva, tras ser alimentada con folíolos de papa), y como variables categóricas las variedades de papa y el tratamiento, el cual corresponde al tipo de herbivoría inducida a la planta (control, o sistémico).

Para corroborar el supuesto de normalidad de los residuales se implementó el test de Shapiro-Wilk y teniendo en cuenta los resultados aportados por esta prueba se procedió a la implementación de un ANOVA robusto, para modelos no paramétricos y desbalanceados, utilizado frecuentemente cuando los datos no cumplen totalmente los supuestos subyacentes al análisis de varianza y/o cuando hay valores extremos o datos influyentes es posible el uso del análisis de varianza robustos.

Para el desarrollo de los correspondientes análisis de datos se utilizó el programa estadístico R.

4 RESULTADOS

4.1 Experimento no.1:

De acuerdo a lo establecido para el experimento no. 1 la variable categórica y la variable respuesta del experimento no. 1 denominado “preferencia de oviposición” corresponde a:

Variable categórica (factor): variedades de papa utilizadas en el experimento

Variable respuesta: variable de tipo cuantitativo correspondiente al número de huevos depositados en las plantas de papa de cada variedad.

Para el análisis de los datos obtenidos del experimento número 1 denominado “preferencia de oviposición” se plantearon las siguientes hipótesis:

4.1.1. Hipótesis planteadas:

Ho (hipótesis nula): No existen diferencias significativas en el número de huevos depositados en las plantas de papa de las diferentes variedades utilizadas en el experimento.

Ha (hipótesis alterna): Existen diferencias significativas en el número de huevos depositados en las plantas de papa de las diferentes variedades utilizadas en el experimento.

4.1.2 Resultados obtenidos en R:

Tabla 2: Análisis de varianza (ANOVA) para la variable respuesta no. De huevos.					
	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr. (>F)
Variedad	20	78564	3928	2.521	0.000601 ***
Residuales	199	310025	1558		

Los resultados aportados por el análisis de varianza de los datos permiten concluir que, de acuerdo al p-valor obtenido (0,000601), con un nivel de significancia del 5% se concluye que se rechaza la hipótesis nula anteriormente planteada (tabla 2).

Tabla 3. Test de Shapiro-Wilk y Kruskal Wallis para la variable no. De huevos.					
W	0.8677		P_valor		6.798 e ⁻¹³
Test de Kruskal – Wallis					
Chi Cuadrado	– 48.4164	Grados de libertad	20	P_valor	0.0003718

Sin embargo a partir de la implementación del test de Shapiro – Wilk ($p_valor = 6.798 e^{13}$), es posible concluir que los residuales no cumplen con los supuestos de normalidad por lo que se implementó el test de Kruskal – Wallis para análisis de datos no paramétricos (tabla 3).

Esta prueba, permite concluir que existen diferencias en la preferencia de oviposición de la especie *Tecia solanivora*, expresada como el número de huevos depositados en la planta, para las variedades de papa incluidas en el ensayo ($p_valor = 0,0003718$). Por tal motivo se implementó el test de Tukey con el fin de evidenciar en cuales variedades de papa se presentaron diferencias con relación a la variable respuesta (tabla 4).

Tabla 4. Resultado de la implementación de la prueba de comparación múltiple para la variable respuesta no. De huevos y cada variedad de papa.			
Multiple comparison test after Kruskal - Wallis			
p.value:		0.05	
Comparisons	obs.dif	critical.dif	difference
CÑ -E	1.045.098.039	9.642.374	TRUE
CÑ-I	1.021.380.090	8.618.020	TRUE
CÑ-PA	1.182.598.039	11.107.258	TRUE

El resultado de la implementación del test de Tukey, permite concluir que, a un nivel de significancia del 5%, existen diferencias estadísticas significativas entre la variedad “Criolla Guaneña” y las variedades “Esmeralda”, “UNICA” y “Punto Azul”.

En la figura 2, se presenta el boxplot de la variable respuesta no. De huevos, para cada una de las variedades de papa contempladas en el experimento El rectángulo de cada caja representa la distribución de los valores, con bases representadas por el primer (Q1) y tercer cuartil (Q3). La barra que atraviesa la caja representa la mediana, las líneas verticales representan la dispersión de los datos y los círculos los valores atípicos, para las variedades de papa utilizadas en el experimento (ver anexo 1: Listado de abreviaturas de variedades de papa).

Este gráfico permite además evidenciar que la especie *T. solanivora* deposito la mayor cantidad de huevos sobre la variedad “Criolla Guaneña”, seguida de las variedades “Criolla Paisa” y “Parda Pastusa”, mientras que las variedades “Esmeralda”, “UNICA”, “Roja Nariño” y “Punto Azul”, reportaron los valores más bajos en el análisis.

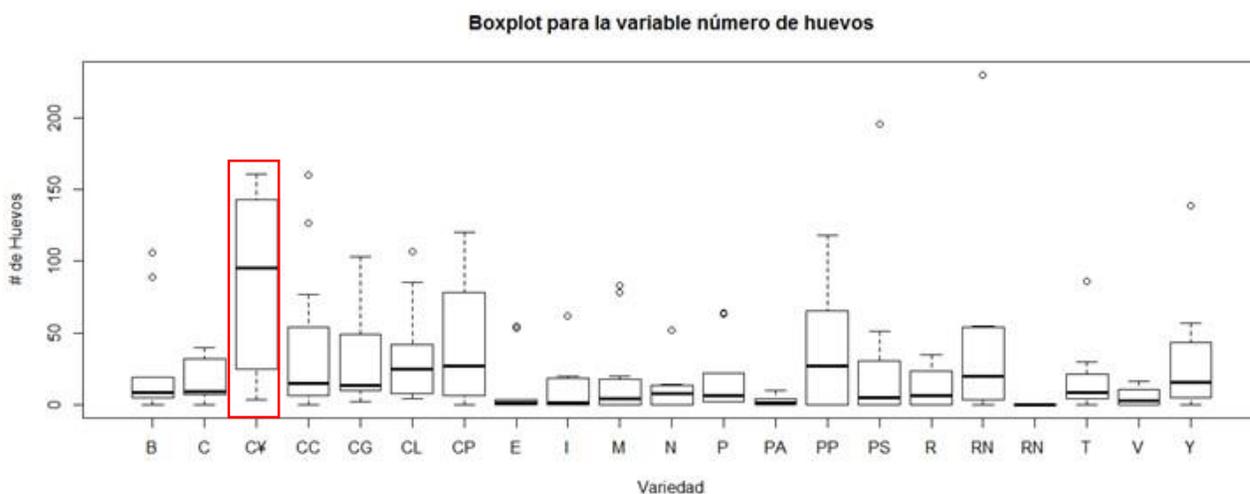


Fig.2. Boxplot para la variable “número de huevos”, como respuesta al experimento denominado “preferencia de oviposición”.

4.2 Experimento no. 2: Tolerancia

El análisis estadístico implementado consistió en un análisis de varianza de dos vías (factorial) multivariado, teniendo como variables:

Variables categóricas: variedad y tratamientos anteriormente descritos (control e inducción)

Variables respuesta: número de tubérculos sanos y peso de los mismos.

4.2.1 Hipótesis planteadas:

Tabla 5. Planteamiento de las hipótesis para el MANOVA del experimento denominado “tolerancia”.	
Ho (hipótesis nula): No existen diferencias significativas en el número de tubérculos sanos y el peso de los mismos en las diferentes variedades utilizadas en el experimento.	Ha (hipótesis alterna): Existen diferencias significativas en el número de tubérculos sanos y el peso de los mismos en las diferentes variedades utilizadas en el experimento.
Ho (hipótesis nula): No existen diferencias significativas en el número de tubérculos sanos y el peso de los mismos con respecto a los tratamientos establecidos.	Ha (hipótesis alterna): Existen diferencias significativas en el número de tubérculos sanos y el peso de los mismos con respecto a los tratamientos establecidos.
Ho (hipótesis nula): No existen diferencias significativas en el número de tubérculos sanos y el peso de los mismos con respecto a la interacción entre los tratamientos y las variedades planteadas.	Ha (hipótesis alterna): existen diferencias significativas en el número de tubérculos sanos y el peso de los mismos con respecto a la interacción entre los tratamientos y las variedades planteadas

4.2.2 Resultados análisis multivariado (MANOVA):

	Grados de libertad	Pillai	F aproximado	Grados de libertad	Den. Grados de libertad	Pr. (>F)
Variedad	1	0.14341	33.318	2	398	4.182 e-14 ***
Tratamiento	20	1.07700	23.279	40	798	< 2.2 e-16 ***
Tratamiento: Variedad	18	0.08484	0.982	36	798	0.5007
Residuales	399					

Análisis del efecto de la variedad: De acuerdo al p_valor obtenido del análisis multivariado de los datos (4.182×10^{-14}) es posible concluir que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la H_0 que plantea que no existe diferencia significativa en el número de tubérculos y peso de los mismos y la variedad de papa evaluada.

Análisis del efecto del tratamiento: De acuerdo al p_valor obtenido del análisis multivariado de los datos ($< 2.22 \times 10^{-16}$) es posible concluir que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la H_0 que plantea que no existe diferencia significativa en el número de tubérculos y peso de los mismos y el tratamiento (control o inducción) efectuado en las plantas (tabla 6).

Análisis de la interacción variedad * tratamiento: De acuerdo al p_valor obtenido del análisis multivariado de los datos, para el análisis de la interacción (0.5007) es posible concluir que, a un nivel de significancia del 5%, no se rechaza la H_0 que plantea que no existe diferencia significativa en el número de tubérculos y peso de los mismos y la interacción entre las variedades y los tratamientos establecidos en el experimento.

4.2.3 Implementación del test de Mardia:

Sin embargo, y con el fin de corroborar que los residuales del análisis cumplieran con el supuesto de normalidad, se implementó el test de Mardia para análisis multivariado de normalidad (tabla 7).

La conclusión del análisis es que los residuales no cumplen con dicho supuesto (p_valor: 2.441846×10^{-6}); por tal motivo se implementó un análisis multivariado por permutaciones, en el cual se plantearon las mismas hipótesis enunciadas anteriormente para el análisis paramétrico de los datos.

Tabla 7: Resultado en R de la implementación del test de Mardia para verificación de la normalidad de los residuales en el análisis multivariado.	
Mardia's Multivariate Normality Test	
data:	fit\$residuals
g1p:	0.4254039
chi.skew:	31.12539
p.value.skew:	2.886284e-06
g2p:	119.477
z.kurtosis:	10.33918
p.value.kurt:	0
chi.small.skew	31.48119
p.value.small:	2.441846e-06
Result: Data is not multivariate normal	

El resultado del análisis de varianza por permutaciones permite concluir nuevamente, que existe un efecto de la variedad (p_valor: 0.001) y del tratamiento (p_valor: 0.003), frente a las variables repuesta número de tubérculos sanos y peso de los mismos, sin evidenciarse efecto de la interacción (tabla 8).

Tabla 8. Resultado en R de la implementación del análisis multivariado por permutaciones.							
Terms added sequentially (first to last)							
	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F. Model	R2	Pr(>F)	
Treat	1	0.2352	0.23520	82.413	0.01256	0.001	***
Variety	20	65.685	0.32842	115.077	0.35078	0.001	***
Treat:Variety	18	0.5344	0.02969	10.402	0.02854	0.412	
Residuals	399	113.872	0.02854	0.60812			
Total	438	187.253	100.000				
--- Signif.codes	0	***	0.001	***	0.01	**	

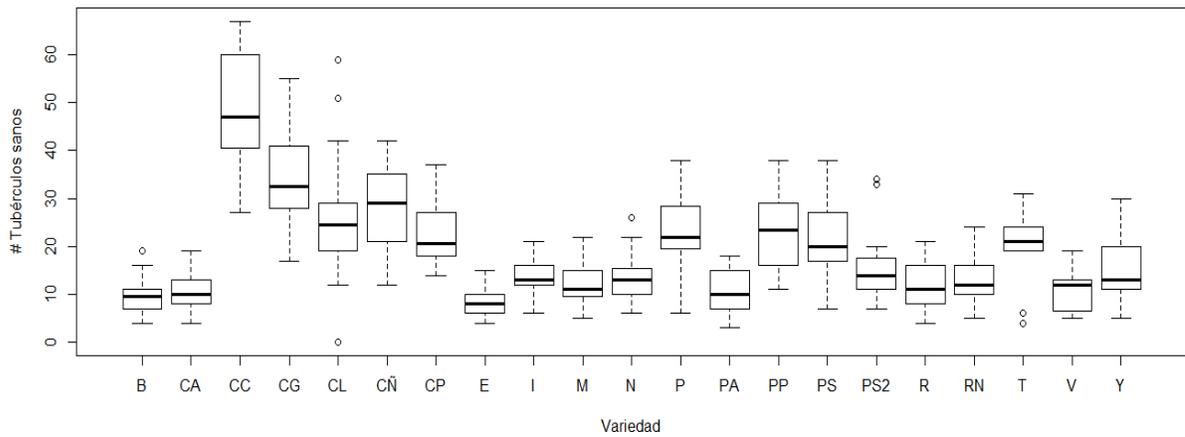


Fig.3. Boxplot para la variable “número de tubérculos sanos”. Q1, mediana, Q3, dispersión de los datos y valores atípicos para cada una de las variedades de papa utilizadas en el experimento.

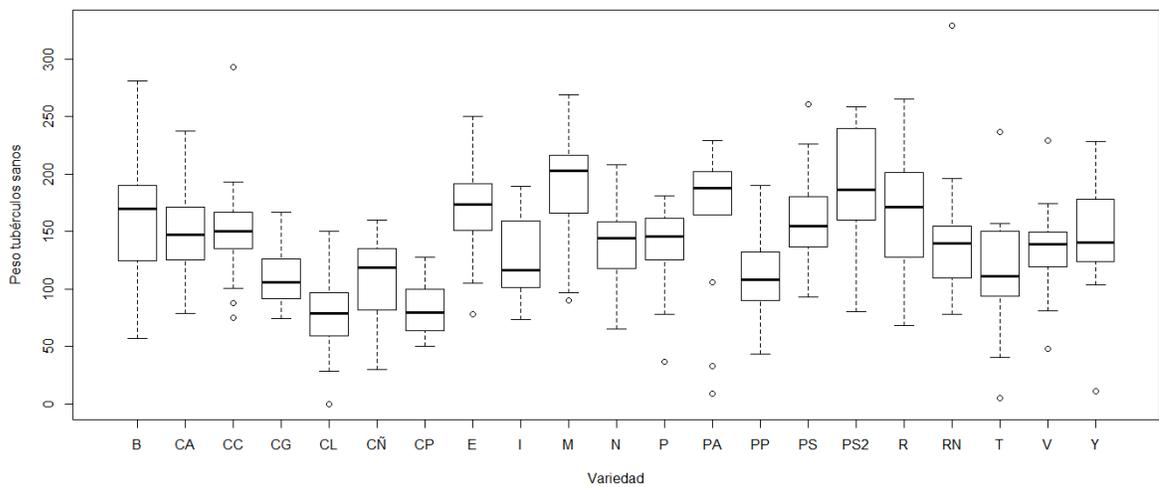


Fig.4. Boxplot para la variable “peso de tubérculos sanos”. Q1, mediana, Q3, dispersión de los datos y valores atípicos para cada una de las variedades de papa utilizadas en el experimento.

Al analizar los gráficos correspondientes a los boxplot para las variables respuesta número de tubérculos sanos y peso de los mismos, es posible concluir que las variedades que produjeron el mayor número de tubérculos sanos corresponden a las variedades del grupo Phureja, como la “Criolla Colombia”, “Criolla Galeras”, “Criolla Guaneña”, “Criolla Latina” y “Criolla Paisa”, seguida de las variedades del grupo Andígena “Puracé”, “Parda Pastusa”, “Pastusa Suprema” y “Toquerreña”. Sin embargo las variedades pertenecientes al grupo Phureja reportaron los valores más bajos en lo que corresponde al peso de los tubérculos sanos, mientras variedades como “Monserrate” y “Pastusa Suprema” reportaron los valores más altos.

4.2.4 Implementación del test T-Student:

Sin embargo, como se explicó en la sección correspondiente a la descripción metodológica de cada experimento, el análisis de las variables “número y peso de tubérculos sanos” no puede analizarse como una medida directa de tolerancia. Esta se expresa como la diferencia en el rendimiento de cada variedad para los tratamientos control e inducción. Para tal fin se implementó la prueba de T-Student para comparación de medias de los tratamientos para cada una de las variedades, asumiendo varianzas diferentes (tabla 9).

La hipótesis nula y la hipótesis alterna, que se plantean para este experimento se expresa como:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

Tabla 9. Resultado de la implementación del test T-Student para comparación de medias de cada tratamiento por cada variedad de papa utilizada.

Variedad	Media tratamiento Control	Media Tratamiento Inducción	Valor Estadístico T	P-valor
B	180,0673	144,0114	1,382736	0,181992
CA	157,7867	148,6867	0,453724	0,655167
CC	168,8645	140,0394	1,979263	0,058900
CG	111,8760	109,6944	0,214556	0,831926
CL	76,41412	72,70308	0,334250	0,740682
CÑ	101,0292	119,2194	-1,48402	0,149384
CP	81,15615	84,36000	-0,364254	0,718858
E	182,0229	147,0583	1,874809	0,077140
I	131,7107	110,0967	0,956269	0,354096
M	189,3613	182,2483	0,375478	0,710472
N	134,4677	153,4100	-0,819037	0,426488
P	145,6823	116,8617	1,661966	0,114847
PS	173,1982	142,8933	1,753891	0,099851
PS2	181,0029	208,5357	-1,25023	0,224351
R	184,9308	137,8144	2,186610	0,040826
RN	146,5540	132,6675	0,620027	0,541910
V	141,1130	119,6400	0,929257	0,369690
Y	142,4507	153,1375	-0,393630	0,699051

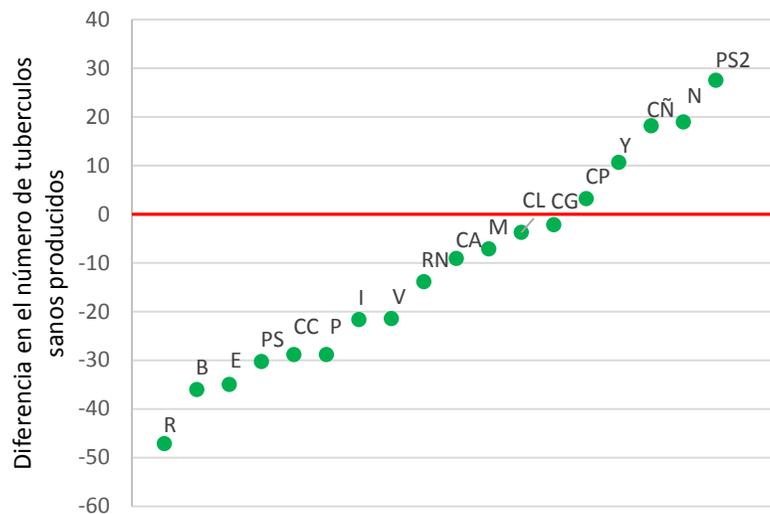


Fig.5. Gráfico correspondiente a la diferencia en el número de tubérculos obtenidos entre el tratamiento “inducción” y “control” para cada variedad de papa.

De acuerdo a los resultados obtenidos a través de la implementación del test de T-Student y de acuerdo al p-valor obtenido para cada variedad, con un nivel de significancia del 5%, es posible concluir que únicamente para la variedad “Rubí”, se rechaza la H_0 planteada y se concluye que las medias muestrales difieren estadísticamente, lo cual se corrobora con el gráfico correspondiente a la diferencia en el número de tubérculos obtenidos entre el tratamiento “inducción” y el tratamiento “control” (fig.5).

Sin embargo puede concluirse además, que para las variedades “Pastusa Suprema”, “Nevada”, “Criolla Guaneña” y “Yungay”, se evidencia una diferencia positiva en la producción de tubérculos sanos entre los tratamientos de inducción y control, lo que sugiere que estas variedades pueden poseer características de tolerancia asociadas a la sobrecompensación, algo que contrasta con los resultados obtenidos para la variedad “Rubí”.

4.3 Experimento no.3: resistencia:

Para el experimento denominado resistencia se establecieron las siguientes variables categóricas y la variable respuesta:

- **Variables categóricas:** Variedades de papa utilizadas en el experimento y tratamientos control e inducción.
- **Variable respuesta:** Número de individuos de *T. solanivora* desarrollados sobre cada variedad de papa y en cada tratamiento anteriormente descrito.

4.3.1 Modelo lineal generalizado de Poisson:

Para el análisis del número de individuos de *T. solanivora* que se desarrollaron sobre cada una de las variedades de papa evaluadas, así como en cada uno de los tratamientos implementados, se utilizó un modelo lineal generalizado de Poisson para el análisis de variables categóricas discretas (conteos).

4.3.2 Planteamiento de las hipótesis:

Tabla 10: Planteamiento de las hipótesis para el análisis del experimento denominado “resistencia”.	
Ho (hipótesis nula): No existen diferencias significativas en el número de individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados en las diferentes variedades de papa utilizadas en el experimento.	Ha (hipótesis alterna): Existen diferencias significativas en el número de individuos de <i>T. solanivora</i> desarrolladas en las diferentes variedades de papa utilizadas en el experimento.
Ho (hipótesis nula): No existen diferencias significativas en el número de individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados, con respecto a los tratamientos establecidos.	Ha (hipótesis alterna): Existen diferencias significativas en el número de individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados, con respecto a los tratamientos establecidos.
Ho (hipótesis nula): No existen diferencias significativas en el número de número de individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados, con respecto a la interacción entre los tratamientos y las variedades planteadas.	Ha (hipótesis alterna): existen diferencias significativas en el número de número de individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados, con respecto a la interacción entre los tratamientos y las variedades planteadas

Los resultados obtenidos a través de la implementación del modelo lineal generalizado de Poisson permite concluir que, a un nivel de significancia del 5 %, se rechaza la hipótesis nula que plantea que no existe diferencias significativas en el número de individuos de *T. solanivora* desarrollados sobre las variedades: “Diacol Capiro”, “Criolla Colombia”, “Criolla Galeras”, “Criolla Latina”, “Criolla Guaneña”, “Criolla Paisa”, “Esmeralda”, “UNICA”, “Monserate”, “Parda Pastusa”, “Toquerreña” y “Yungay” (tabla 11)

Tabla 11. Detalle del resultado en R correspondiente a la implementación del modelo lineal generalizado de Poisson para el análisis de la variable no. De individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados en cada variedad y tratamiento.			
Deviance Residuals:			
Min 1Q Median 3Q Max			
-2.6458 -1.2123 -0.4596 0.5777 3.6733			
Coefficients: (6 not defined because of singularities)			
	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	2.659	0.007843	**
Variedad CA	-2.096	0.036057	*
Variedad CC	2.325	0.020084	*
Variedad CG	3.444	0.000573	***
Variedad CL	3.037	0.002388	**
Variedad CÑ	3.194	0.001403	**
Variedad CP	2.338	0.019375	*
Variedad E	-2.573	0.010075	*
Variedad I	-3.042	0.002352	**
Variedad M	-2.586	0.009701	**
Variedad N	-2.289	0.022108	*
Variedad P	-0.439	0.660443	
Variedad P	0.306	0.759490	
Variedad PA	0.978	0.328190	
Variedad PP	-2.817	0.004849	**
Variedad PS	-1.108	0.268031	
Variedad R	1.577	0.114905	
Variedad RN	0.601	0.547573	
Variedad T	-2.958	0.003098	**
Variedad V	-0.052	0.958434	
Variedad Y	-4.266	1.99e-05	***
Variedad Y: Tratamiento LT	3.641	0.000271	***
Signif. codes:	0 '****'	0.001 '***'	0.01 '**'

Frente al efecto del tratamiento, se concluye que a un nivel de significancia del 5% no se rechaza la H_0 que plantea que no existen diferencias significativas en el número de individuos de *T. solanivora* que se desarrollaron en cada tratamiento. Sin embargo, al analizar los resultados se evidencia efecto de interacción entre la variedad “Yungay” y el tratamiento de inducción Local.

4.3.3 Modelo para conteos inflados con ceros:

Considerando el número de ceros presentes en la variable respuesta, se implementó la metodología de modelo para conteos inflados con ceros.

Tabla 12. Detalle del resultado en R correspondiente a la implementación del modelo para conteos inflados con ceros, implementado para el análisis de la variable respuesta no. De individuos de <i>T. solanivora</i> desarrollados en cada variedad y tratamiento.			
Zero-inflation model coefficients (binomial with logit link):			
	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	-1.478	0.1394	
Variedad CA	1.234	0.2170	
Variedad CC	0.723	0.4694	
Variedad CG	0.609	0.5427	
Variedad CL	0.668	0.5041	
Variedad CÑ	0.208	0.8354	
Variedad CP	0.749	0.4536	
Variedad E	1.043	0.2968	
Variedad I	0.915	0.3604	
Variedad M	1.230	0.2185	
Variedad N	1.352	0.1764	
Variedad P	1.083	0.2790	
Variedad P	-0.006	0.9952	
Variedad PA	-0.004	0.9971	
Variedad PP	1.100	0.2711	
Variedad PS	0.371	0.7104	
Variedad R	0.718	0.4728	
Variedad RN	0.569	0.5694	
Variedad T	0.987	0.3237	
Variedad V	-0.121	0.9033	
Variedad Y	1.479	0.1392	
Tratamiento LT	2.103	0.0355	*
Tratamiento ST	0.168	0.8666	
Signif. codes:	0 '****'	0.001 '***'	0.01 '**'

De acuerdo al p-valor (0,0355) obtenido y a un nivel de significancia del 5%, se concluye que se rechaza la hipótesis nula que plantea que no existe diferencia significativa entre el número de individuos desarrollados en el tratamiento de inducción local y el tratamiento control. Así mismo se concluye que no se rechaza la H_0 que plantea que no existen

diferencias en el número de individuos que se desarrollaron en cada una de las variedades utilizadas en el experimento.

4.3.4 Test de Vuong:

Con el fin de verificar cuál de las dos metodologías implementadas para el experimento de resistencia, es la más apta para el análisis de los datos, se utilizó el test de Vuong.

Tabla 13. Resultado en R correspondiente a la implementación del test de Vuong.
Vuong Non-Nested Hypothesis Test-Statistic: -57.29839 (test-statistic is asymptotically distributed $N(0,1)$ under the null that the models are indistinguishable) In this case:
model2 > model1, with p-value < 2.22e-16

La implementación del test permite corroborar, que a un nivel de significancia del 5%, de acuerdo al p_valor obtenido (< 2.22e-16) el modelo 2, correspondiente al modelo para conteos inflados con ceros, se ajusta mejor para el análisis de los datos en comparación con el modelo 1.

4.3.5 Bioensayo con *Spodoptera frugiperda*:

Los datos obtenidos a partir de la implementación del bioensayo con la especie polífaga *Spodoptera frugiperda*, fueron analizados inicialmente a través de una ANOVA de dos vías con la variedad y el tratamiento como factores y la diferencia en el peso de las larvas de *S. frugiperda* (peso final – inicial) como variable respuesta.

Tabla 14: Análisis de varianza para la variable respuesta “diferencia en el peso de las larvas de <i>S. frugiperda</i> ”: resultados del test de Shapiro – Wilk.					
	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr. (>F)
Variedad	4	0.001912	0.0004779	2.879	0.0249*
Tratamiento	1	0.000125	0.0001250	0.753	0.3869
Variedad: Tratamiento	4	0.000430	0.0001074	0.647	0.6298
Residuales	143	0.023741	0.0001660		
Test de Shapiro-Wilk					
W	0.9062		P_valor		2.337 e ⁻¹³

Sin embargo, a partir de la implementación del test de Shapiro – Wilk (tabla 14), se aprecia que los residuales del análisis no cumplen con los supuestos de normalidad, por lo cual se procedió a implementar un ANOVA robusta para diseños multivariados no balanceados.

Tabla 15. Resultado en R correspondiente a la implementación del ANOVA Robusta para análisis de los datos del Bioensayo con <i>S. frugiperda</i> .					
Robust ANOVA Table					
	DF	RD	Mean RD	F	p-value
Tratamiento	1	0.00472	0.00472	0.78227	0.37793
Variedad	4	0.05075	0.01269	210.160	0.08367
Tratamiento :Variedad	4	0.00703	0.00176	0.29116	0.88334

A partir de los resultados obtenidos a través de la implementación de ANOVA robusta (tabla 15), es posible concluir que, de acuerdo al p_valor obtenido no se evidencia un efecto significativo de la variedad (0.08367) y el tratamiento (0.37793), sobre el desarrollo de larvas de *Spodoptera frugiperda*.

5. DISCUSIÓN:

A partir de los experimentos implementados es posible concluir que existen diferencias en la respuesta de las variedades de papa a la herbivoría inducida por la especie *Tecia solanivora*. A través del análisis de los datos correspondientes al experimento denominado “preferencia de oviposición”, en el cual se evaluó este aspecto de la biología de la especie plaga sobre diferentes variedades de papa cultivadas, se concluye que las hembras de la polilla guatemalteca prefirieron realizar la oviposición sobre las variedades “Criolla Guaneña”, “Criolla Paisa” y “Parda Pastusa”, mientras que en variedades como “Esmeralda”, “Punto Azul”, “Roja Nariño” y “UNICA”, se evidencian valores cercanos a cero. Existe una expectativa intuitiva que las hembras adultas de herbívoros depositan sus huevos donde el desarrollo de su descendencia será óptimo, teoría denominada “Preference –Performance” (Elton, 1927). La justificación científica de esta teoría se fundamenta en el hecho que los instares o estados juveniles de las especies de herbívoros tienen una mínima capacidad para desplazarse del sitio en donde la madre ha depositado los huevos, por lo que esta debe seleccionar adecuadamente a la especie vegetal hospedera para maximizar el desarrollo de la descendencia (Gómez Jimenez, y otros, 2014).

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible concluir que, para las variedades “Esmeralda”, “Punto Azul” y “Roja Nariño”, existan características de resistencia asociadas a interrumpir o alterar la oviposición de las hembras de *T. solanivora*, evitando así que estas depositen sus huevos cerca de ellas. Este rasgo de resistencia, según lo estipulado en la teoría “Preference –Performance”, puede ser identificado oportunamente por la hembra de la plaga, prefiriendo esta depositar sobre variedades de papa que puedan garantizar el desarrollo de la progenie.

Frente a los resultados obtenidos para el experimento definido como “Tolerancia” y de acuerdo a los resultados del análisis de las variables “número y peso de los tubérculos sanos”, es posible concluir que existe un efecto de los tratamientos de herbivoría inducida implementados así como de las variedades de papa contempladas en el experimento. Al analizar los datos correspondientes a la diferencia entre el número de tubérculos obtenidos entre los tratamientos de inducción y control, es posible observar que existe un aumento en el número de tubérculos obtenidos para las variedades “Pastusa Suprema”, “Yungay”, “Criolla Paisa”, “Criolla Guaneña” y “Nevada”, en donde se aprecia un efecto de sobrecompensación expresado en un incremento en el número de tubérculos sanos en plantas donde se indujo la herbivoría en comparación con plantas control. Según Poveda y colaboradores (2012), la variedad “Pastusa Suprema”, posee características de tolerancia, expresada en términos de sobrecompensación, donde la planta al ser atacada por *T. solanivora* tiene la capacidad de compensar el daño realizado a sus tubérculos a través del incremento en la producción de los mismos; sin embargo a la fecha, se desconocía que otras variedades de papa, tanto del grupo *Phureja* como *Andígena*, tuvieran este tipo de propiedades de tolerancia (Poveda, Gomez Jimenez, Halitschke, & Kessler, 2012).

A partir de la implementación del test T-Student, para la comparación de medias de cada tratamiento por cada variedad de papa utilizada, se concluye que si bien existe un efecto de la variedad y del tratamiento implementado sobre el número de tubérculos sanos y peso de los mismos, únicamente para la variedad “Rubí” se evidencia una diferencia estadísticamente significativa entre la media del tratamiento control e inducción. Al apreciar el gráfico correspondiente se concluye que, para esta variedad en particular, se aprecia una reducción significativa en el número de tubérculos producidos por plantas afectadas por herbivoría en comparación con plantas control, lo que nos permite concluir que esta variedad no posee características de tolerancia, expresada como sobrecompensación.

A partir de la implementación del modelo para conteos inflados con ceros, correspondiente al análisis del experimento denominado “resistencia”, es posible concluir que se evidencia un efecto del tratamiento de inducción local vs. tratamiento control, sobre el desarrollo de los individuos de *T. solanivora*. A través del modelo lineal generalizado de Poisson, implementado como primera opción para el análisis de la variable “Número de individuos de *T. solanivora* desarrollados” se evidencia un efecto de las variedades “Criolla Guaneña”, “Criolla Latina”, “Criolla Galeras”, “Criolla Colombia” y “Criolla Paisa”, siendo mayor el número de individuos que se desarrollan sobre estas variedades en comparación con variedades como “Esmeralda”, “Única” y “Diacol Capiro”, donde el número de individuos que se desarrollaron fue significativamente menor; sin embargo al no existir un efecto estadísticamente significativo de la interacción entre las variedades y los tratamientos, es posible concluir que, las diferencias en el número de individuos de *T. solanivora* desarrollados sobre cada una de las variedades de papa, estarían asociadas a propiedades intrínsecas (constitutivas) de cada una de estas y no a características de resistencia inducidas por la herbivoría.

Como resultado de la implementación del análisis realizado al experimento denominado “bioensayo con *Spodoptera frugiperda*”, se concluye que, a partir de la inducción local y sistémica de la herbivoría, no se evidencia un efecto sobre el desarrollo de larvas de la especie fitófaga en mención. Esto permite concluir que, para las variedades de papa del grupo *Phureja*, la herbivoría producto del ataque a los tubérculos por *T. solanivora*, no induce características de resistencia en otras estructuras de la planta.

A partir de los experimentos diseñados para identificar los rasgos de resistencia y tolerancia, se evidencia que para ciertas variedades de papa hay un efecto de resistencia asociado a afectar o interrumpir el proceso de oviposición de las hembras adultas de *T. solanivora*. Este es el principal rasgo de resistencia apreciado sobre variedades de papa del grupo *Andigena* y *Phureja*; todos los resultados y análisis de datos realizados son el primer avance en la identificación de características de resistencia y tolerancia a *T. solanivora* en variedades de papa, lo que permite construir la línea base para el inicio de proyectos de mejoramiento genético enfocados al desarrollo de variedades de papa con características de resistencia /tolerancia al ataque de herbívoros.

6. CONCLUSIONES

- A partir de la implementación del test de Kruskal Wallis, para el análisis de la variable no. De huevos, se concluye que existen diferencias significativas frente a la oviposición de la polilla guatemalteca de la papa, en las variedades de papa seleccionadas para el experimento. En este caso se evidenció una preferencia por parte de las hembras de la especie *T. solanivora*, a depositar los huevos sobre la variedad “Criolla Guaneña” y una baja oviposición sobre plantas de las variedades “Esmeralda”, “Punto Azul” y “UNICA”. Esto sugiere que, para estas últimas variedades, pueden existir rasgos de resistencia, física o química, que interfiere en la oviposición natural de la especie plaga.
- De acuerdo a los resultados obtenidos para el experimento definido como tolerancia y a los resultados del análisis de las variables “número y peso de los tubérculos sanos”, es posible concluir que existe un efecto de los tratamientos de herbivoría inducida implementados así como de las variedades de papa contempladas en el experimento.
- A partir del análisis estadístico de las variables respuesta, es posible concluir que en las variedades “Pastusa Suprema”, “Yungay”, “Criolla Paisa”, “Criolla Guaneña” y “Nevada”, se aprecia un efecto de sobrecompensación expresado en un incremento en el número de tubérculos sanos en plantas donde se indujo la herbivoría en comparación con plantas control, contrario a lo evidenciado para la variedad “Rubí”, donde se evidenció una reducción significativa en el número de tubérculos sanos producidos en plantas donde se indujo el daño realizado por la polilla guatemalteca de la papa.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir de la implementación del modelo para conteos inflados con ceros, se aprecia un efecto del tratamiento de inducción local vs. tratamiento control, sobre el desarrollo de los individuos de *T. solanivora*. Sin embargo no se evidencian diferencias significativas entre las variedades de papa seleccionadas para el experimento.
- De acuerdo a los resultados obtenidos a través de todos los análisis estadísticos realizados es posible concluir que, variedades como “Esmeralda”, “Punto Azul” y “UNICA”, poseen características de resistencia asociadas a interrumpir o interferir en la oviposición de *T. solanivora*. Así mismo se evidenciaron características de sobrecompensación, asociado a un mecanismo de tolerancia, en las variedades “Pastusa Suprema”, “Yungay”, “Criolla Paisa”, “Criolla Guaneña” y “Nevada”.

7. TRABAJOS CITADOS

- Adler, L., & Irwin, R. (2005). Ecological costs and benefits of defenses in nectar. *Ecology*, 86, 2986-2978.
- Agrios, G. (1997). *Plant Pathology*. Academic Press.
- Allaby, M. (2006). *A Dictionary of Ecology*. Oxford University Press.
- Anderson, M., Cajo, J., & Braak, T. (2003). PERMUTATION TESTS FOR MULTI-FACTORIAL. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 85-113.
- Arias, J. (1996). Evaluación de la incidencia y severidad de daño de la polilla gigante de la papa *Tecia solanivora* (Lepidoptera: Gelechiidae) en Antioquia. En: Seminario experiencias y avances en el manejo de la polilla guatemalteca de la papa. *Memorias de Seminario SOCOLEN, Bogotá (Colombia)*, 20-22.
- Bailey, A., David, C., Wyn P., G., Justin, G., Gillian, P., & Mark, T. (2010). *BIOPESTICIDES, Pest Management and Regulation*. CAB International.
- Borror, D., Triplehorn, C., & Johnson, N. (1989). *An introduction to the study of insects*.
- Cabrera Peña, J., Rojas, J., Galeano, G., & Meza, V. (1995). Mortalidad embrionaria y éxito de eclosión en huevos de *Trachemys scripta* (Testudines: Emydidae) incubados en un área natural protegida. *Rev. Biol. Trop.*, 841-846.
- Calderón Rodríguez, J. (2009). *LOS WITHANÓLIDOS COMO RESISTENCIA QUÍMICA DE LA UCHUVA*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias Básicas.
- Corpoica, Fedepapa, Ica, & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (1998). *La Polilla Guatemalteca de la papa, Biología, Comportamiento y Prácticas de Manejo Integrado*. Francois Herrera, Regional Agrícola.
- Delphia, C., De Moraes, C., Stephenson, A., & Mescher, M. (2009). Imbreeding in horsenettle influences herbivore resistance. *Ecological Entomology*, 34, 513-519.
- Elton, C. (1927). *Animal Ecology*. London: Sidgwick and Jackson.
- Esau, K. (1985). *Anatomía vegetal*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- FAO. (2006). NIMF 5, Glosario de términos fitosanitarios. *Normas Internacionales Para Medidas Fitosanitarias*.
- FEDEPAPA. (2015, marzo 23). FEDEPAPA. Retrieved from http://www.fedepapa.com/?page_id=401
- Figueroa Arboccó, G. (2005). Modelo de regresión Poisson para el análisis de datos con respuestas en forma de conteos. In *La fecundidad y su relación con variables socioeconómicas, demográficas y educativas aplicando el Modelo de Regresión Poisson* (pp. 1-19). Lima: Facultad de Ciencias Matemáticas - Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Gómez Jimenez, M. I., Sarmiento, C. E., Diaz, M. F., Chautá, A., Peraza, A., Ramírez, A., & Poveda, K. (2014). Oviposition, larval preference, and larval performance in. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1-10.
- González, N., Abad, J., & Lévy, J. (2006). Normalidad y otros supuestos en análisis de covarianzas. In J. Lévy, *Modelización con estructuras de covarianzas* (pp. 31-57).
- Granados Sánchez, D., Puga, R., & Barrera Escorcía, H. (2008). Ecología de la herbivoría. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 14(1), 51-63.
- Grimaldi, D., & Engel, M. (2005). *Evolution of the Insects*. Cambridge University Press.

- Karban, R., & Baldwin, I. (1997). Induced responses to herbivory. *The University of Chicago Press*.
- Kessler, A., & Baldwin, I. (2002). Plant responses to insect herbivory: The emerging molecular analysis. *Annual Review of Plant Biology*, 53, 299-328.
- López - Avila, A. (1996). Insectos plagas del cultivo de la papa en Colombia y su manejo. In *Papas Colombianas con el mejor entorno ambiental* (pp. 146-154).
- López González, E., & Ruiz Soler, M. (2011). Análisis de Datos con el Modelo Lineal Generalizado. Una aplicación Con R. *Revista Española de Pedagogía*, 59-80.
- Namhyun, K. (2010). The limit distribution of a modified Shapiro–Wilk statistic for normality to type II censored data. *Journal of the Korean Statistical Society*, 257-266.
- Núñez - Farfan, J., Fornoni, J., & Valverde, P. (2007). The evolution of resistance and tolerance to herbivore. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 38, 541-566.
- Pimentel, D. (1991). Diversification of biological-control strategies in agriculture. *Crop Protection*, 10, 243-253.
- Poveda, K., Gomez Jimenez, M., Halitschke, R., & Kessler, A. (2012). Overcompensating plants: their expression of resistance traits and effects on herbivore preference and performance. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 245-253.
- Poveda, K., Gómez, M. I., & Kessler, A. (2010). The enemy as ally: herbivore - induced increase in crop yield. *Ecological Applications*, 1718-1793.
- Richards, R. (2000). Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. *Journal of Experimental Botany*, 51, 447-458.
- Rincón, R., & López, A. (2004). Dimorfismo sexual en pupas de *Tecia solanivora* (Povolny) (Lepidoptera: Gelechiidae). *Revista Corpoica*, 5, 1.
- Rodríguez Jaume, M. J., & Mora Catalá, R. (2001). Análisis de varianza simple (o con un factor), factorial y multivariable. *Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante*. Retrieved Abril 10, 2015, from <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/12081>
- Rodríguez, L. (2009). Origen y evolución de la papa cultivada. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 19 pp.
- Ruxton, G., & Beauchamp, G. (2008). Some suggestions about appropriate use of the Kruskal - Wallis Test. *Animal Behavior*, 1083-1087.
- Salinas Rodríguez, A., Manrique Espinoza, B., & Sosa Rubí, S. (2009). Análisis estadístico para datos de conteo: aplicaciones para el uso de los servicios de salud. *Salud pública Mexicana*, 397-406.
- SIC, S. d. (2011). *Cadena productiva de la papa: Diagnóstico de libre competencia*. Retrieved from <http://www.sic.gov.co/drupal/sites/default/files/files/PAPA.pdf>
- Soriano, J. (2000). Algunos aspectos relacionados con el comportamiento de *Tecia solanivora* (Polilla Guatemalteca) en condiciones de cultivo. *Papas Colombianas 2000, con el mejor entorno ambiental*, 3(1-2), 168-173.
- Strauss, A., & Agrawal, A. (1999). The ecology and evolution of plant tolerance to herbivory. *Trends in Ecology and Evolution*, 14, 179-185.
- Strauss, S., & Agrawal, A. (1999). The ecology and evolution of plant tolerance to herbivory. *TREE*, 14(5), 179-185.
- Strauss, S., Watson, W., & Allen, M. (2003). Predictors of male and female tolerance to insect herbivory in *Raphanus raphanistrum*. *Ecology*, 84, 2074-2082.

- Velasco Vázquez, M., & Suarez Cerrilo, S. F. (2008). Un Modelo de Regresión Poisson Inflado con Ceros para analizar datos de un Experimento de Fungicidas en Jitomate. *Facultad de estadística e informática. Universidad Veracruzana*, 1-60.
- Vives Brosa, J. (2002). El diagnóstico de la sobredispersión en modelos de análisis de datos de recuento. *Departament de Psicobiologia i de Metodologia de les Ciències de la Salut. Universitat Autònoma de Barcelona*, 94 pp.
- Weining, C., Stinchcombe, J., & Schmitt, J. (2003). Evolutionary genetics of resistance and tolerance to natural herbivory in *Arabidopsis thaliana*. *Evolution*, 57, 1270-1280.
- Yañez Canal, S., Jaramillo, M. C., & Correa Morales, J. (1999). Una revisión de medidas multivariadas de asimetría y Kurtosis para pruebas de multinormalidad. *Revista Colombiana de Estadística*, 5-16.

8. ANEXOS:

Anexo 1: Listado de abreviaturas de variedades de papa utilizadas en los experimentos:

No.	Abreviatura	Variedad Comercial
1	CP	Criolla Paisa
2	CG	Criolla Galeras
3	CÑ	Criolla Guaneña
4	CL	Criolla Latina
5	CC	Criolla Colombia
6	Y	Yungay
7	E	Esmeralda
8	PA	Punto Azul
9	RN	Roja Nariño
10	CA	Capiro
11	R	Rubí
12	N	Nevada
13	B	Betina
14	M	Monserrate
15	P	Puracé
16	T	Toquerreña
17	V	Variedad No. 1
18	PS	Pastusa Suprema
19	PP	Parda Pastusa
20	I	UNICA
21	PS 2	Pastusa Suprema – segunda generación

Anexo 2: Comandos y salida en R para el análisis de varianza, test de Shapiro Wilk y test de Kruskal Wallis, correspondiente al análisis de la variable no. De huevos del experimento de “Preferencia de Oviposición”:

```
> variety=as.factor(variety)
> datos=read.table("oviposicionMFD.csv",header=T,sep=";",dec=",")
> fit=aov(eggs~variety)
> summary(fit)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
variety         20  78564     3928   2.521 0.000601 ***
Residuals     199 310025     1558
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> shapiro.test(fit$residuals)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  fit$residuals
W = 0.8677, p-value = 6.798e-13

> kruskal.test(eggs~variety)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  eggs by variety
Kruskal-Wallis chi-squared = 48.4164, df = 20, p-value = 0.0003718
```

Anexo 3: Comando y salida en R correspondiente a la implementación del test de Tukey para datos no paramétricos correspondientes a la variable no. De huevos del experimento denominado “Preferencia de Oviposición”:

```
> kruskalmc(eggs ~ variety)
Multiple comparison test after Kruskal-Wallis
p.value: 0.05
Comparisons
```

	obs.dif	critical.dif	difference				
B-C	1.9333333	130.46703	FALSE	C-PP	9.3166667	124.50645	FALSE
B-CY	65.0098039	96.42374	FALSE	C-PS	17.4333333	124.50645	FALSE
B-CC	21.5208333	97.46121	FALSE	C-R	18.0500000	128.11608	FALSE
B-CG	26.5000000	98.62381	FALSE	C-RN	11.0500000	128.11608	FALSE
B-CL	27.6458333	97.46121	FALSE	C-RN	86.1000000	256.23217	FALSE
B-CP	28.9333333	98.62381	FALSE	C-T	3.5000000	128.11608	FALSE
B-E	39.5000000	110.26477	FALSE	C-V	46.1000000	156.90952	FALSE
B-I	37.1282051	101.42884	FALSE	C-Y	11.6500000	124.50645	FALSE
B-M	19.6666667	105.13333	FALSE	CY-CC	43.4889706	81.47334	FALSE
B-N	25.2291667	113.65832	FALSE	CY-CG	38.5098039	82.86057	FALSE
B-P	0.8888889	110.26477	FALSE	CY-CL	37.3639706	81.47334	FALSE
B-PA	53.2500000	123.27976	FALSE	CY-CP	36.0764706	82.86057	FALSE
B-PP	11.2500000	103.14325	FALSE	CY-E	104.5098039	96.42374	TRUE
B-PS	15.5000000	103.14325	FALSE	CY-I	102.1380090	86.18020	TRUE
B-R	16.1166667	107.47280	FALSE	CY-M	84.6764706	90.51097	FALSE
B-RN	12.9833333	107.47280	FALSE	CY-N	90.2389706	100.28675	FALSE
B-RN	84.1666667	246.55952	FALSE	CY-P	65.8986928	96.42374	FALSE
B-T	1.5666667	107.47280	FALSE	CY-PA	118.2598039	111.07258	TRUE
B-V	44.1666667	140.56055	FALSE	CY-PP	53.7598039	88.19154	FALSE
B-Y	13.5833333	103.14325	FALSE	CY-PS	80.5098039	88.19154	FALSE
C-CY	63.0764706	118.99944	FALSE	CY-R	81.1264706	93.21814	FALSE
C-CC	19.5875000	119.84162	FALSE	CY-RN	52.0264706	93.21814	FALSE
C-CG	24.5666667	120.78900	FALSE	CY-RN	149.1764706	240.68821	FALSE
C-CL	25.7125000	119.84162	FALSE	CY-T	66.5764706	93.21814	FALSE
C-CP	27.0000000	120.78900	FALSE	CY-V	109.1764706	129.98649	FALSE
C-E	41.4333333	130.46703	FALSE	CY-Y	51.4264706	88.19154	FALSE
C-I	39.0615385	123.08995	FALSE	CC-CG	4.9791667	84.06559	FALSE
C-M	21.6000000	126.16000	FALSE	CC-CL	6.1250000	82.69858	FALSE
C-N	27.1625000	133.34745	FALSE	CC-CP	7.4125000	84.06559	FALSE
C-P	2.8222222	130.46703	FALSE	CC-E	61.0208333	97.46121	FALSE
C-PA	55.1833333	141.63766	FALSE	CC-I	58.6490385	87.33943	FALSE
				CC-M	41.1875000	91.61542	FALSE
				CC-N	46.7500000	101.28466	FALSE
				CC-P	22.4097222	97.46121	FALSE
				CC-PA	74.7708333	111.97440	FALSE
				CC-PP	10.2708333	89.32467	FALSE

CP-PS	44.4333333	90.59175	FALSE	M-PS	4.1666667	97.63825	FALSE
CP-R	45.0500000	95.49209	FALSE	M-R	3.5500000	102.20128	FALSE
CP-RN	15.9500000	95.49209	FALSE	M-RN	32.6500000	102.20128	FALSE
CP-RN	113.1000000	241.57800	FALSE	M-RN	64.5000000	244.30779	FALSE
CP-T	30.5000000	95.49209	FALSE	M-T	18.1000000	102.20128	FALSE
CP-V	73.1000000	131.62676	FALSE	M-V	24.5000000	136.57220	FALSE
CP-Y	15.3500000	90.59175	FALSE	M-Y	33.2500000	97.63825	FALSE
E-I	2.3717949	101.42884	FALSE	N-P	24.3402778	113.65832	FALSE
E-M	19.8333333	105.13333	FALSE	N-PA	28.0208333	126.32416	FALSE
E-N	14.2708333	113.65832	FALSE	N-PP	36.4791667	106.76340	FALSE
E-P	38.6111111	110.26477	FALSE	N-PS	9.7291667	106.76340	FALSE
E-PA	13.7500000	123.27976	FALSE	N-R	9.1125000	110.95178	FALSE
E-PP	50.7500000	103.14325	FALSE	N-RN	38.2125000	110.95178	FALSE
E-PS	24.0000000	103.14325	FALSE	N-RN	58.9375000	248.09573	FALSE
E-R	23.3833333	107.47280	FALSE	N-T	23.6625000	110.95178	FALSE
E-RN	52.4833333	107.47280	FALSE	N-V	18.9375000	143.23814	FALSE
E-RN	44.6666667	246.55952	FALSE	N-Y	38.8125000	106.76340	FALSE
E-T	37.9333333	107.47280	FALSE	P-PA	52.3611111	123.27976	FALSE
E-V	4.6666667	140.56055	FALSE	P-PP	12.1388889	103.14325	FALSE
E-Y	53.0833333	103.14325	FALSE	P-PS	14.6111111	103.14325	FALSE
I-M	17.4615385	95.82540	FALSE	P-R	15.2277778	107.47280	FALSE
I-N	11.8990385	105.10806	FALSE	P-RN	13.8722222	107.47280	FALSE
I-P	36.2393162	101.42884	FALSE	P-RN	83.2777778	246.55952	FALSE
I-PA	16.1217949	115.44431	FALSE	P-T	0.6777778	107.47280	FALSE
I-PP	48.3782051	93.63770	FALSE	P-V	43.2777778	140.56055	FALSE
I-PS	21.6282051	93.63770	FALSE	P-Y	14.4722222	103.14325	FALSE
I-R	21.0115385	98.38645	FALSE	PA-PP	64.5000000	116.95345	FALSE
I-RN	50.1115385	98.38645	FALSE	PA-PS	37.7500000	116.95345	FALSE
I-RN	47.0384615	242.73666	FALSE	PA-R	37.1333333	120.78900	FALSE
I-T	35.5615385	98.38645	FALSE	PA-RN	66.2333333	120.78900	FALSE
I-V	7.0384615	133.74139	FALSE	PA-RN	30.9166667	252.64833	FALSE
I-Y	50.7115385	93.63770	FALSE	PA-T	51.6833333	120.78900	FALSE
M-N	5.5625000	108.68722	FALSE	PA-V	9.0833333	150.98625	FALSE
M-P	18.7777778	105.13333	FALSE	PA-Y	66.8333333	116.95345	FALSE
M-PA	33.5833333	118.71225	FALSE	PP-PS	26.7500000	95.49209	FALSE
M-PP	30.9166667	97.63825	FALSE	PP-R	27.3666667	100.15295	FALSE
PP-RN	1.7333333	100.15295	FALSE				
PP-RN	95.4166667	243.45802	FALSE				
PP-T	12.8166667	100.15295	FALSE				
PP-V	55.4166667	135.04621	FALSE				
PP-Y	2.3333333	95.49209	FALSE				
PS-R	0.6166667	100.15295	FALSE				
PS-RN	28.4833333	100.15295	FALSE				
PS-RN	68.6666667	243.45802	FALSE				
PS-T	13.9333333	100.15295	FALSE				
PS-V	28.6666667	135.04621	FALSE				
PS-Y	29.0833333	95.49209	FALSE				
R-RN	29.1000000	104.60634	FALSE				
R-RN	68.0500000	245.32362	FALSE				
R-T	14.5500000	104.60634	FALSE				
R-V	28.0500000	138.38119	FALSE				
R-Y	29.7000000	100.15295	FALSE				
RN-RN	97.1500000	245.32362	FALSE				
RN-T	14.5500000	104.60634	FALSE				
RN-V	57.1500000	138.38119	FALSE				
RN-Y	0.6000000	100.15295	FALSE				
RN -T	82.6000000	245.32362	FALSE				
RN -V	40.0000000	261.51586	FALSE				
RN -Y	97.7500000	243.45802	FALSE				
T-V	42.6000000	138.38119	FALSE				
T-Y	15.1500000	100.15295	FALSE				
V-Y	57.7500000	135.04621	FALSE				

Anexo 4: Comandos y salida en R para el MANOVA implementado para el análisis de las variables “Número de tubérculos sanos” y “peso de los tubérculos “, correspondientes al experimento denominado “Tolerancia”:

```
> attach(datos)
> Treat=as.factor(Treat)
> Variety=as.factor(Variety)
>
> y=data.frame(nr_undamaged_tubers,weight_undamaged_tubers)
> y=as.matrix(y)
>
> fit=manova(y~Treat*Variety)
>
> summary(fit)
```

	Df	Pillai	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)
Treat	1	0.14341	33.318	2	398	4.182e-14 ***
Variety	20	1.07700	23.279	40	798	< 2.2e-16 ***
Treat:Variety	18	0.08484	0.982	36	798	0.5007
Residuals	399					

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Anexo 5: Comando y salida en R correspondiente a la implementación del test de Mardia para verificación del supuesto de normalidad de los residuales en el MANOVA implementado para análisis de las variables “no. De tubérculos sanos” y “peso de los tubérculos”.

```
> mardiaTest(fit$residuals)
Mardia's Multivariate Normality Test
-----
data : fit$residuals

g1p      : 0.4254039
chi.skew : 31.12539
p.value.skew : 2.886284e-06

g2p      : 11.9477
z.kurtosis : 10.33918
p.value.kurt : 0

chi.small.skew : 31.48119
p.value.small : 2.441846e-06

Result      : Data is not multivariate normal.
-----
```

Anexo 6: Comandos y salida en R correspondiente al perMANOVA implementado para análisis de las variables “no. De tubérculos sanos” y “peso de los tubérculos”.

```

> fit2=adonis(y~Treat*Variety)
Mensajes de aviso perdidos
In vegdist(lhs, method = method, ...) :
  you have empty rows: their dissimilarities may be meaningless in method "bray"
>
> summary(fit2)
      Length Class Mode
aov.tab      6  anova list
call         2 -none- call
coefficients 84 -none- numeric
coef.sites 18438 -none- numeric
f.perms     2997 -none- numeric
model.matrix 17560 -none- numeric
terms        3  terms call
> fit2$aov.tab
Terms added sequentially (first to last)

      Df SumsOfSqs MeanSqs F.Model    R2 Pr(>F)
Treat    1    0.2352 0.23520   8.2413 0.01256 0.001 ***
Variety  20    6.5685 0.32842  11.5077 0.35078 0.001 ***
Treat:Variety 18    0.5344 0.02969   1.0402 0.02854 0.412
Residuals 399   11.3872 0.02854
Total    438   18.7253
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Anexo 7: Comandos y salida en R de la implementación de los modelos: lineal generalizado con distribución Poisson, conteos inflados con zeros y test de Vuong, para el análisis de la variable “número de individuos de *T. solanivora* desarrollados” correspondiente al experimento denominado “resistencia”:

```
> fit3=glm(Peso~Variedad*Tratamiento,family="poisson",data=datosres)
> summary(fit3)
```

Call:

```
glm(formula = Peso ~ Variedad * Tratamiento, family = "poisson",
    data = datosres)
```

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.6458	-1.2123	-0.4596	0.5777	3.6733

Coefficients: (6 not defined because of singularities)

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	0.47000	0.17678	2.659	0.007843	**
VariedadCA	-0.64185	0.30619	-2.096	0.036057	*
VariedadCC	0.55450	0.23852	2.325	0.020084	*
VariedadCG	0.78276	0.22728	3.444	0.000573	***
VariedadCL	0.69315	0.22822	3.037	0.002388	**
VariedadCÑ	0.79851	0.25000	3.194	0.001403	**
VariedadCP	0.53144	0.22728	2.338	0.019375	*
VariedadE	-0.77228	0.30012	-2.573	0.010075	*
VariedadI	-1.02962	0.33850	-3.042	0.002352	**
VariedadM	-0.87547	0.33850	-2.586	0.009701	**
VariedadN	-0.65233	0.28504	-2.289	0.022108	*
VariedadP	-0.10899	0.24810	-0.439	0.660443	
VariedadPA	0.22314	0.72887	0.306	0.759490	
VariedadPP	0.22314	0.22822	0.978	0.328190	
VariedadPP	-0.78016	0.27696	-2.817	0.004849	**
VariedadPS	-0.29565	0.26693	-1.108	0.268031	
VariedadR	0.36291	0.23019	1.577	0.114905	
VariedadRN	0.14518	0.24141	0.601	0.547573	
VariedadT	-1.56862	0.53033	-2.958	0.003098	**
VariedadV	-0.01325	0.25413	-0.052	0.958434	
VariedadY	-1.68640	0.39528	-4.266	1.99e-05	***
TratamientoLT	-0.06454	0.37731	-0.171	0.864184	
TratamientoST	-0.65233	0.48088	-1.357	0.174937	
VariedadCA:TratamientoLT	0.76702	0.51350	1.494	0.135255	
VariedadCC:TratamientoLT	-0.95997	0.49490	-1.940	0.052414	.

VariedadCG:TratamientoLT	-0.56919	0.44859	-1.269	0.204499
VariedadCL:TratamientoLT	-0.27763	0.45077	-0.616	0.537958
VariedadCÑ:TratamientoLT	-0.56212	0.47565	-1.182	0.237288
VariedadCP:TratamientoLT	0.08759	0.43406	0.202	0.840072
VariedadE:TratamientoLT	0.21267	0.60651	0.351	0.725855
VariedadI:TratamientoLT	-0.29214	0.85188	-0.343	0.731649
VariedadM:TratamientoLT	0.78016	0.54070	1.443	0.149061
VariedadN:TratamientoLT	-0.15861	0.83208	-0.191	0.848829
VariedadP:TratamientoLT	0.68435	0.48494	1.411	0.158179
VariedadP :TratamientoLT	NA	NA	NA	NA
VariedadPA:TratamientoLT	NA	NA	NA	NA
VariedadPP:TratamientoLT	0.08701	0.72191	0.121	0.904063
VariedadPS:TratamientoLT	0.49632	0.52275	0.949	0.342398
VariedadR:TratamientoLT	-0.33305	0.47215	-0.705	0.480562
VariedadRN:TratamientoLT	0.20312	0.47772	0.425	0.670691
VariedadT:TratamientoLT	NA	NA	NA	NA
VariedadV:TratamientoLT	0.78644	0.50261	1.565	0.117653
VariedadY:TratamientoLT	2.15640	0.59219	3.641	0.000271 ***
VariedadCA:TratamientoST	-0.37980	0.79189	-0.480	0.631504
VariedadCC:TratamientoST	0.74585	0.52547	1.419	0.155785
VariedadCG:TratamientoST	0.06286	0.53100	0.118	0.905772
VariedadCL:TratamientoST	0.63780	0.52581	1.213	0.225135
VariedadCÑ:TratamientoST	0.70205	0.52591	1.335	0.181901
VariedadCP:TratamientoST	0.59534	0.52862	1.126	0.260073
VariedadE:TratamientoST	0.61813	0.70005	0.883	0.377246
VariedadI:TratamientoST	0.29565	0.90254	0.328	0.743233
VariedadM:TratamientoST	0.04619	0.75139	0.061	0.950983
VariedadN:TratamientoST	0.42918	0.88388	0.486	0.627277
VariedadP:TratamientoST	-0.11415	0.71523	-0.160	0.873193
VariedadP :TratamientoST	NA	NA	NA	NA
VariedadPA:TratamientoST	NA	NA	NA	NA
VariedadPP:TratamientoST	1.18562	0.69044	1.717	0.085942 .
VariedadPS:TratamientoST	0.98880	0.60930	1.623	0.104625
VariedadR:TratamientoST	0.97210	0.52849	1.839	0.065860 .
VariedadRN:TratamientoST	0.26028	0.59856	0.435	0.663673
VariedadT:TratamientoST	NA	NA	NA	NA
VariedadV:TratamientoST	0.19557	0.68160	0.287	0.774172
VariedadY:TratamientoST	-12.43386	346.04716	-0.036	0.971337

```

> fit5=zeroinfl(Peso~Variedad*Tratamiento),data=datosres)
Error: inesperado ', ' in "fit5=zeroinfl(Peso~Variedad*Tratamiento),"
> summary(fit5)
Error en summary(fit5) : objeto 'fit5' no encontrado
> library(pscl)
> fit5=zeroinfl(Peso~Variedad+Tratamiento),data=datosres)
Error: inesperado ', ' in "fit5=zeroinfl(Peso~Variedad+Tratamiento),"
> fit5=zeroinfl(Peso~Variedad+Tratamiento,data=datosres)
> summary(fit5)

```

Call:

```
zeroinfl(formula = Peso ~ Variedad + Tratamiento, data = datosres)
```

Pearson residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-1.5134	-0.7272	-0.3202	0.4858	9.2452

Count model coefficients (poisson with log link):

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	0.39941	0.18474	2.162	0.030612	*
VariedadCA	0.06552	0.28740	0.228	0.819666	
VariedadCC	0.71391	0.21550	3.313	0.000924	***
VariedadCG	0.66794	0.21445	3.115	0.001842	**
VariedadCL	0.87135	0.21145	4.121	3.78e-05	***
VariedadCÑ	0.85175	0.21257	4.007	6.15e-05	***
VariedadCP	0.82799	0.20975	3.948	7.90e-05	***
VariedadE	-0.26408	0.33660	-0.785	0.432711	
VariedadI	-0.68120	0.46851	-1.454	0.145953	
VariedadM	-0.09256	0.31454	-0.294	0.768543	
VariedadN	0.01918	0.33069	0.058	0.953756	
VariedadP	0.42105	0.24601	1.712	0.086989	.
VariedadP	0.29375	0.73084	0.402	0.687735	
VariedadPA	0.34663	0.25204	1.375	0.169042	
VariedadPP	-0.19369	0.32014	-0.605	0.545174	
VariedadPS	0.04451	0.26315	0.169	0.865697	
VariedadR	0.68358	0.21623	3.161	0.001571	**
VariedadRN	0.33865	0.23859	1.419	0.155786	
VariedadT	-0.90049	0.97542	-0.923	0.355910	

VariedadV	0.12889	0.26901	0.479	0.631844
VariedadY	-0.24281	0.38492	-0.631	0.528162
TratamientoLT	0.16584	0.08659	1.915	0.055453 .
TratamientoST	-0.03275	0.08548	-0.383	0.701628

Zero-inflation model coefficients (binomial with logit link):

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-2.90256	1.96401	-1.478	0.1394
VariedadCA	2.51458	2.03700	1.234	0.2170
VariedadCC	1.47373	2.03718	0.723	0.4694
VariedadCG	1.24308	2.04199	0.609	0.5427
VariedadCL	1.36149	2.03803	0.668	0.5041
VariedadCÑ	0.43526	2.09420	0.208	0.8354
VariedadCP	1.51974	2.02773	0.749	0.4536
VariedadE	2.18665	2.09607	1.043	0.2968
VariedadI	2.08005	2.27405	0.915	0.3604
VariedadM	2.53657	2.06157	1.230	0.2185
VariedadN	2.77158	2.05014	1.352	0.1764
VariedadP	2.19317	2.02599	1.083	0.2790
VariedadP	-12.35215	2053.61148	-0.006	0.9952
VariedadPA	-0.01027	2.81716	-0.004	0.9971
VariedadPP	2.28056	2.07244	1.100	0.2711
VariedadPS	0.83131	2.23889	0.371	0.7104
VariedadR	1.46235	2.03694	0.718	0.4728
VariedadRN	1.19057	2.09275	0.569	0.5694
VariedadT	2.70120	2.73714	0.987	0.3237
VariedadV	-1.87559	15.44119	-0.121	0.9033
VariedadY	3.04435	2.05893	1.479	0.1392
TratamientoLT	0.61108	0.29062	2.103	0.0355 *
TratamientoST	0.06012	0.35787	0.168	0.8666

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Number of iterations in BFGS optimization: 62

Log-likelihood: -1140 on 46 Df

> `vuong(fit3,fit5)`

Vuong Non-Nested Hypothesis Test-Statistic: -57.29839

(test-statistic is asymptotically distributed N(0,1) under the null that the models are indistinguishable)

in this case:

model2 > model1, with p-value < 2.22e-16

Anexo 8: Resultados del análisis de varianza, test de Shapiro Wilk y ANOVA robusta para el análisis de la variable “diferencia en el peso de las larvas de *S. frugiperda*” correspondiente al bioensayo con *Spodoptera frugiperda*.

```
> datosres2=read.table("Resistencia2MFD.csv",header=T,sep=";",dec=",")
> names(datosres2)
[1] "Trat"      "Var"      "Diferencia"
> fit6=aov(Diferencia~Var*Trat,data=datosres2)
> summary(fit6)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Var	4	0.001912	0.0004779	2.879	0.0249 *
Trat	1	0.000125	0.0001250	0.753	0.3869
Var:Trat	4	0.000430	0.0001074	0.647	0.6298
Residuals	143	0.023741	0.0001660		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
> shapiro.test(fit6$residuals)
```

Shapiro-Wilk normality test

```
data: fit6$residuals
W = 0.9062, p-value = 2.337e-08
```

```
> raov(Diferencia~Trat+Var)
```

Robust ANOVA Table

	DF	RD	Mean RD	F	p-value
Trat	1	0.00471	0.00471	0.77961	0.37874
Var	4	0.05075	0.01269	2.10154	0.08367
Trat:Var	4	0.00703	0.00176	0.29115	0.88335