


# Diseño de un plan de muestreo para la verificación de enfermedades en cultivos de cítricos

**Kevin Steven García Chica**
**José Alejandro Vargas Franco**

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería, Escuela de Estadística
Santiago de Cali, Colombia
2020

# Diseño de un plan de muestreo para la verificación de enfermedades en cultivos de cítricos

**Kevin Steven García Chica**
**José Alejandro Vargas Franco**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
**Estadístico**

Director:
Ph.D. Jaime Mosquera Restrepo
Codirectora:
Ph.D. Nubia Murcia Riaño

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería, Escuela de Estadística
Santiago de Cali, Colombia
2020

## Dedicatoria

*A mis padres, por apoyarme y ayudarme en este gran proceso y por ser mi compañía en momentos de dificultad.*
*A mi abuela, quien fue la persona que me llevó a ser lo que soy, que siempre estuvo a mi lado, que me formó, inculcándome grandes valores y despertando en mí el interés y amor por el estudio.*
*A mi abuelo, quien siempre me trasmite su felicidad y me demuestra el orgullo que siente por mí y por quien soy. Por las palabras que siempre me motivaron a seguir y finalizar este proceso: "Mi sueño es verte graduado y siendo profesional, cuando eso pase, me puedo ir tranquilo".*
*A mi hermana, quien se convirtió en mi fuente de felicidad y motivación, por la cual construyo este camino y espero ser un gran ejemplo para ella.*

*Kevin Steven García Chica*

*A mis padres Esmeralda Franco y José Enrique Vargas, por haberme formado como la persona que soy hoy, por su apoyo y consejo en cada momento de vida.*

*José Alejandro Vargas Franco*

# Agradecimientos

Agradecemos a Dios, por darnos salud y sabiduría para culminar satisfactoriamente este proyecto y alcanzar este logro.

A nuestros padres y familiares, por su acompañamiento y apoyo incondicional durante este proceso.

A todos los profesores que nos formaron profesionalmente y como personas, en especial al profesor Jaime Mosquera Restrepo por darnos la oportunidad de trabajar a su lado, por su gran de dedicación, y por orientarnos y apoyarnos a lo largo de este trabajo.

Agradecemos a la corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA), especialmente a la Dra. Nubia Murcia Riaño, por confiar en nosotros y tener la disposición para atendernos y brindarnos la información requerida.

Finalmente, agradecemos a la Universidad del Valle, quien ha sido nuestra segunda casa y la sede de todo el conocimiento adquirido durante estos años.

# Resumen

A nivel mundial, los cultivos citrícolas están siendo afectados por múltiples enfermedades capaces de acabar masivamente con estos y generar escasez. Para mantener la economía que gira alrededor de estos productos, es necesario verificar la calidad de las plantas que los producen. En el presente trabajo se propone un diseño de un plan de muestreo para verificar enfermedades en lotes de cítricos, con el objetivo de aceptar/rechazar lotes según su cumplimiento con un nivel de calidad predefinido. Este diseño basado en el muestreo de aceptación para atributos e implementado en una herramienta web construida, resultó ser útil en términos de riesgos asociados y comportamiento de los tamaños de muestra, comparado con la normativa actual implementada para la evaluación de lotes de cítricos en Colombia. Concluyendo que los planes cero defectos, usualmente aplicados en contextos industriales para el control de la calidad, resultan ser una solución adecuada para tratar problemas relacionados con la calidad en otras áreas, en este caso en la agricultura.

**Palabras clave: Muestreo de aceptación, cero defectos, riesgo del consumidor, tamaño de muestra, control de calidad, evaluación, herramienta web, vivero, lote de cítricos.**

# Abstract

Globally, citrus crops are being affected by multiple diseases capable of massively ending them and creating shortages. To maintain the economy that revolves around these products, it is necessary to check the quality of the plants that produce them. This work proposes a design of a sampling plan to verify diseases in citrus lots, to accept/reject lots according to their compliance with a predefined level of quality. This design based on acceptance sampling for attributes and implemented in a web tool built, proved useful in terms of associated risks and sample size behavior, compared to the current regulations implemented for the evaluation of citrus lots in Colombia. Concluding that zero defect plans, usually applied in industrial contexts for quality control, turn out to be an appropriate solution to treat quality-related problems in other areas, in this case in agriculture.

**Keywords: Acceptance sampling, zero defects, consumer risk, sample size, quality control, evaluation, web tool, nursery, citrus lot.**

# Contenido

**Resumen** vii

**Lista de Figuras** xii

**Lista de Tablas** xiv

**1. Introducción** 1
1.1. Planteamiento del problema . . . 2
1.2. Justificación . . . 3
1.3. Objetivos . . . 4
1.3.1. Objetivo General . . . 4
1.3.2. Objetivos Específicos . . . 4
1.4. Antecedentes . . . 5
1.4.1. Antecedentes contextuales . . . 5
1.4.2. Antecedentes estadísticos . . . 6

**2. Marco Teórico** 10
2.1. Marco Contextual . . . 10
2.2. Marco Estadístico . . . 16

**3. Metodología** 32
3.1. Visitas de campo . . . 33
3.2. Análisis de datos históricos . . . 33
3.3. Diseño de una estrategia de construcción de un plan de muestreo . . . 33
3.4. Construcción de herramienta de computo . . . 34
3.5. Análisis de sensibilidad . . . 35
3.6. Verificación de riesgo . . . 35
3.7. Recomendaciones sobre el muestreo en campo . . . 35

**4. Resultados** 36
4.1. Visita de campo . . . 36
4.2. Análisis de datos históricos . . . 37
4.3. Diseño de una estrategia de construcción de un plan de muestreo . . . 38
4.4. Herramienta de computo . . . 40
4.4.1. Ilustración de la metodología y del uso de la herramienta web . . . 41

4.5. Análisis de sensibilidad . . . . . 43
4.6. Verificación de riesgo . . . . . 47
4.7. Tabulación de los planes de muestreo . . . . . 48
4.8. Recomendaciones para el muestreo en campo . . . . . 50

**5. Conclusiones y recomendaciones** **53**
5.1. Conclusiones . . . . . 53
5.2. Recomendaciones . . . . . 54

**A. Anexo: Guía de observación** **56**

**B. Anexo: Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$)** **58**

**Bibliografía** **59**

# Lista de Figuras

**2-1**. Curvas de operación para lotes grandes. Calculo basado en distribución Binomial. Casos de ejemplo $(n = 125, c = 0)$ $(n = 18, c = 0)$. . . . . 20
**2-2**. Curvas AOQ y AOQL. Casos de ejemplo $(n = 125, c = 0)(n = 18, c = 0)$. . . 22
**2-3**. Curvas ATI. Casos de ejemplo $(n = 125, c = 0)(n = 18, c = 0)$. . . . . 23
**2-4**. Nomograma Binomial. . . . . 24
**2-5**. Curvas de operación para planes de muestreo $c = 0$. . . . . 26
**2-6**. Planes de muestreo $c = 0$. . . . . 27
**2-7**. Muestreo en Zig-zag. . . . . 30
**2-8**. Muestreo de radio fijo. . . . . 30
**2-9**. Muestreo de distancia de k-árboles $(k = 6)$. . . . . 30

**3-1**. Esquema de metodología y actividades por fases. . . . . 32

**4-1**. Lotes de citrícos en viveros . . . . . 36
**4-2**. Aplicación web: Interfaz gráfica . . . . . 40
**4-3**. Aplicación web: Modulo de Diseño de un plan de muestreo . . . . . 41
**4-4**. Aplicación web: Modulo de Evaluación de un plan de muestreo . . . . . 41
**4-5**. Ilustración del uso de la aplicación web, Ejemplo 1. . . . . 42
**4-6**. Ilustración del uso de la aplicación web, Ejemplo 2. . . . . 43
**4-7**. Comparación metodología vs normativa actual - Categoría Registrada. . . . 45
**4-8**. Comparación metodología vs normativa actual - Categoría Certificada. . . . 46
**4-9**. Simulación: Porcentajes de aceptación y rechazo de lotes de mala calidad. . . 47
**4-10**.Relación entre el tamaño de lote y el tamaño de muestra óptimo. . . . . 48
**4-11**.Procedimiento de selección de plantas - Esquema General . . . . . 50
**4-12**.Procedimiento de selección de plantas - Ilustración . . . . . 51

# Lista de Tablas

**2-1**. Verificación fitosanitaria de plagas y porcentajes de muestreo para especies cítricas. . . . . 15

**4-1**. Riesgo del consumidor $\beta$ para los planes de muestreo de la norma 12816 para virus de la tristeza. . . . . 38
**4-2**. Indicadores de sobre costo y sobre riesgo para los planes de muestreo . . . . 44
**4-3**. Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$) para $RQL = 0.05$. 49

**B-1**. Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$) para $RQL = 0.01$. 58
**B-2**. Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$) para $RQL = 0.1$. 58

# 1. Introducción

Actualmente, a nivel mundial, la industria citrícola se está viendo perjudicada por múltiples enfermedades que afectan su producción, entre ellas se encuentran el virus de la tristeza y el Huanglongbing (HLB); esta última es la enfermedad más devastadora, ya que ocasiona la reducción masiva en la producción de frutas y la muerte de árboles infectados. En Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), mediante la Resolución 1668 de 2019, declaró el HLB y a su vector, el insecto Diaphorina citri Kuwayama, como plagas de control oficial. En esta resolución también se establecen las medidas fitosanitarias para su vigilancia y manejo. Sin embargo, dicha enfermedad ya se encuentra en ocho departamentos del país. Debido a lo anterior, es muy importante establecer un método de evaluación de los lotes de cítricos, evitando la propagación de la enfermedad a todos los departamentos y la posterior escasez de los cultivos citrícolas. En este sentido, el presente trabajo propone una metodología estadística para definir un plan de muestreo para la verificación fitosanitaria de plagas en lotes de citrícos.

La metodología desarrollada se centró en la teoría del muestreo para aceptación de lotes, adaptando esta metodología propia de la estadística industrial a este contexto de verificación fitosanitaria. Específicamente se diseñó una estrategia de construcción de un plan de muestreo cero defectos, basado en el riesgo del consumidor ($\beta$: probabilidad de aceptar un lote no tolerable) asociado a un nivel de calidad rechazable ($RQL$) del lote de cítricos, el cual se define como el porcentaje no tolerable de plantas infectadas en un lote. Para facilitar la interacción del usuario con la metodología planteada y evitar la realización de los tediosos cálculos matemáticos, se diseñó una aplicación web, de fácil acceso y manipulación. En esta aplicación el usuario puede, después de ingresar los parámetros que definen los requerimientos del plan de muestreo, encontrar el tamaño de muestra mínimo que satisface las condiciones de riesgo para el consumidor y analizar el desempeño de dicho plan a través de indicadores cuantitativos y de su representación gráfica.

Los resultados de este trabajo serán utilizados por la Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA) y se perfila como una nueva propuesta para modificar los tamaños de muestra utilizados actualmente por el ICA, para la evaluación de las medidas fitosanitarias de los viveristas[1]. Además, la metodología empleada y la aplicación

[1]Toda persona natural o jurídica que se dedique a la producción y/o comercialización de semilla sexual y/o asexual de cítricos, cuyo vivero se encuentre registrado ante la Gerencia Seccional del ICA.

desarrollada, trasciende al problema de verificación de lotes de cítricos. Esta metodología puede ser empleada para verificar la presencia de enfermedades en cualquier cultivo, o incluso, en otros contextos donde se requiera la evaluación de artículos o elementos bajo un nivel de calidad establecido y un riesgo asociado para el consumidor, por ejemplo, se puede aplicar en la evaluación de lotes de producción en la industria, o en la salud, evaluando lotes de medicamentos o elementos, donde los niveles de calidad y los riesgos asociados deban ser muy bajos.

## 1.1. Planteamiento del problema

En Colombia, al mes de Junio del 2019 se reportan cerca de 104.367 hectáreas sembradas de cítricos entre cultivos de naranja, limón, mandarina, toronja, tangelo, pomelo y lima, según datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR 2019), este es el grupo de frutales con mayor área sembrada en el país después del plátano, y genera aproximadamente 499.570 empleos entre directos e indirectos.

Según la organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el territorio colombiano es una de las siete naciones que puede ser una despensa mundial de alimentos, gracias a que tiene suficiente superficie para ampliar la frontera agrícola sin necesidad de talar bosques. Por otro lado, Colombia goza de privilegios naturales como ser el tercer país con mayor recurso hídrico, además de una gran diversidad climática. A pesar de las ventajas comparativas que ofrecen muchas regiones del país para el desarrollo citrícola, la falta de escalas comerciales significativas, la alta dispersión geográfica de la producción, la falta de gestión empresarial y de desarrollo tecnológico, hacen que la producción y comercialización de cítricos sean poco competitivos en el mercado nacional e internacional. Además, el sector enfrenta problemas para incursionar en los mercados externos, debido a que, entre otros factores, no se cuenta con las variedades ni calidades adecuadas requeridas, no hay continuidad en la oferta exportable e igualmente se deben superar problemas de empaque y presentaciones, así como barreras técnicas y sanitarias. Sumado a lo anterior, se percibe una baja integración entre la industria y la agricultura, no hay material vegetal certificado, falta investigación y transferencia de tecnología (desarrollo de variedades y calidades) en la fase agrícola y agroindustrial, así como prevención de plagas y enfermedades (Aguilar et al. 2020).

En el caso particular de los cultivos de cítricos, existen diversas enfermedades que los afectan, las cuales se pueden transmitir de una planta a otra por propagación vegetativa, es decir, injertos, esquejes, etc., por transmisión mecánica provocadas por herramientas agrícolas como tijeras de podar, y por vectores (organismos o insectos), que son muy dañinas para este cultivo. Las enfermedades que se presentan con mayor frecuencia en Colombia son

el virus de la tristeza, Huanglongbing(HLB), Leprosis y Exocortis; cada una de ellas posee características específicas en cuanto a su sintomatología y consecuencias. Estas enfermedades debilitan el árbol, generando producciones escasas, de baja calidad o con un valor de mercado inferior, y en casos avanzados pueden llegar a matar el árbol. Al sembrar una planta con alguna de estas infecciones, se perdería el dinero invertido en su mantenimiento y no se obtendrían las ganancias o productos esperados, por lo cual se necesita asegurar o garantizar que las plantas sembradas estén limpias de éstas enfermedades. A pesar de estas trágicas consecuencias, en la actualidad no se ha implementado en el país un sistema de certificación de material vegetal que garantice la calidad de la propagación y la seguridad de la especie.

Para la implementación del sistema, la principal dificultad radica en que la mayoría de estas enfermedades son asintomáticas en la etapa de vivero (edades tempranas de la planta), que tiene una duración de 12 a 36 meses. Es decir, en esta etapa no se puede diferenciar a simple vista una planta infectada de una no infectada. Para ello es necesario realizar una prueba serológica denominada DAS-ELISA (Garnsey 1991) (para virus de la tristeza), que evalúa el verdadero estado de la planta.

Por lo general los lotes de cítricos son de gran tamaño y es imposible (por restricciones económicas y logísticas) inspeccionar todo un lote. Considerando estas restricciones, la verificación del lote se realiza a través de muestreo estadístico, que se diseña para decidir si el lote cumple con las condiciones para ser aceptado. Se debe tener en cuenta que la inspección por muestreo no evalúa la calidad del lote, es decir, no se realizan inferencias sobre el lote en general, simplemente se decide si se acepta o se rechaza. Teniendo en cuenta lo anterior, surge la pregunta de investigación: ¿Cómo se puede diseñar un plan de muestreo para aceptar o rechazar lotes con probabilidades de error controladas?

## 1.2. Justificación

Como se mencionó anteriormente, los frutales de cítricos son los más sembrados en Colombia, después del plátano, y generan miles de empleos directos e indirectos, siendo un producto sumamente importante para la economía del país.

Con el propósito de evitar epidemias en la población de cítricos, surge la necesidad de regular la forma en que los viveros producen dichas plantas y garantizar que no se reproduzcan plantas infectadas. Enfermedades como el virus de la tristeza, HLB, Leprosis, Exocortis, entre otras, pueden ocasionar una disminución considerable en la producción, o generarse pérdidas de lotes enteros o que la calidad de las frutas esté por debajo de lo esperado.

La inspección por muestreo es una herramienta de control de calidad muy utilizada en

la industria, la cual proporciona un medio racional de verificación de los requisitos o especificaciones técnicas que debe cumplir un lote de producción o de materia prima. La inspección total no garantiza el cumplimiento al 100 % y es demasiado lenta y costosa. En lugar de evaluar todos las unidades, se toma una muestra aleatoria, se inspecciona o se prueba, y se toma la decisión de aceptar o rechazar todo el lote de producción. A pesar de que estas técnicas fueron inicialmente creadas para la industria, su utilidad se ha ampliado a otros campos como la salud, el mercadeo y las finanzas, generando buenos resultados estadísticos, reduciendo costos y tiempo invertido en la evaluación.

La posibilidad de discernir entre lotes infectados y no infectados evitará a largo plazo posibles plagas de estas enfermedades, las cuales actualmente ya se están viendo propagadas en varias regiones del país. También es relevante conocer qué tipo de plantas se están entregando a los productores y finalmente cuál es la calidad de cultivo de cítricos que tenemos en nuestra región, esto permitirá no solo ser competentes sino también sostener una economía que gira alrededor de estos productos agrícolas.

Cabe resaltar que los planes de muestreo que finalmente se desarrollaron pueden llegar a ser de utilidad no solo para el sector de los cítricos y la agricultura en general, si no también para cualquier problema de aceptación y rechazo de lotes en los que se debe proteger al consumidor y los requerimientos de calidad son muy estrictos, es decir, se admite una cantidad muy pequeña de defectuosos en el lote. Esto hace que esta labor no sea solo un aporte para un sector en particular si no que también pueda ser utilizado en la industria y/o la salud.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

- Diseñar una estrategia metodológica general para la construcción de planes de muestreo para aceptación y rechazo de lotes de cultivos de cítricos en viveros.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades del plan de muestreo y caracterizar el proceso de cultivo de cítricos.
- Diseñar una estrategia para la construcción de un plan de muestreo que satisfaga el riesgo del consumidor de los lotes.
- Construir una aplicación o herramienta de computo que, para un conjunto de parámetros que definen los requerimientos del muestreo, proporcione el plan de muestreo óptimo.

- Generar recomendaciones complementarias para la ejecución del plan de muestreo.

## 1.4. Antecedentes

A continuación se presentan algunos antecedentes tanto contextuales como estadísticos. El primer grupo de investigaciones son estudios sobre análisis de estas enfermedades en lotes de plantas. A pesar de que no tienen un análisis estadístico, son de gran ayuda, para conocer las estrategias de muestreo empleadas para la evaluación de enfermedades. El segundo grupo de investigaciones, corresponde a estudios en los cuales se aplicó o diseñó un plan muestreo para aceptación en diferentes contextos.

### 1.4.1. Antecedentes contextuales

Se realizó una revisión de artículos, tesis y trabajos relacionados con la verificación de enfermedades en cultivos, con el objetivo de indagar acerca de cómo se ha trabajado esta problemática a lo largo del tiempo, enfatizando en el calculo de los tamaños de muestra y la forma de seleccionar las plantas para la conformación de las muestras. Estos trabajos se presentan en orden cronológico ascendente.

**Matos & Borbón (2008)**
Estudiaron el estado del virus de la tristeza de los cítricos en viveros y plantaciones comerciales. Se seleccionaron 9 viveros de la república dominicana. En los viveros se muestrearon el 1 % o 2 % del total de las plantas, de acuerdo al tamaño del vivero los cuales estuvieron en un rango aproximado de 2000 plantas los pequeños y 40000 los más grandes, a mayor número de plantas se tomó el 1 % y en los viveros pequeños el 2 % aproximadamente. Las plantas fueron seleccionadas de una forma predeterminada, siguiendo la metodología de (Hughes & Gottwald 1999) y (Gottwald & Hughes 2000).

No se evidencia que el calculo del tamaño de la muestra haya sido a través de métodos probabilísticos.

**Izquierdo (2010)**
Estudió los distintos factores que determinan la epidemiología de PPV(plum pox virus) y CTV(Citrus tristeza virus) en vivero, con el fin de establecer posibles estrategias de control.

Para el primer virus (PPV) se dispuso de dos parcelas, una con alta incidencia y otra con baja incidencia del virus. La primera parcela (alta incidencia) se dividió en dos subparcelas, cada una de las cuales estuvo formado por dos bloques de plantas. La subparcela 1 contó con dos filas de plantas divididas en 4 grupos cada una, cada grupo contaba con un total de 40 plantas, por lo que finalmente se tenían 8 grupos para un total de 320 plantas. A esta

subparcela se le muestreo únicamente **una de las filas**. En la subparcela 2 se plantaron 6 grupos de plantas, cada grupo consistió en 2 filas de plantas, y cada fila se dividió a su vez en 4 grupos, teniendo un total de 1040 plantas. En esta subparcela el muestreo se realizó tomando las **4 primeras filas**. La segunda parcela (baja incidencia) también se dividió en 2 subparcelas. La subparcela 1 estuvo constituida por 6 grupos de plantas, cada grupo formado por dos filas y cada fila formada por 6 bloques. El número total de plantas por bloque fue de 45, para un total de plantas de 3240. Esta subparcela se muestreo tomando al azar **5 plantas de cada uno de los 72 bloques**.

Para el segundo virus (CTV) se dispuso de una parcela con alta incidencia. Esta también se dividió en dos subparcelas. La subparcela 1 estuvo formada por 5 filas, donde cada fila contenía 140 plantas para un total de 700 plantas. El muestreo para determinar la incidencia viral en la subparcela 1 se hizo tomando **2 hojas por planta**.

Se aprecia que los tamaños de muestra y la forma de recolección fueron obtenidos bajo una metodología de diseño de experimentos.

**Parke et al. (2014)**
Describen la estructura de las comunidades de Phytophthora descubiertas durante un análisis de riesgo realizado en 4 viveros comerciales de Oregón durante un período de 4 años. Se tomaron muestras de los 4 viveros cada 2 meses durante 4 años, recolectando 5 plantas de cada uno de los cuatro géneros suceptibles a Phytophthora en cada fecha de muestreo. Se seleccionaron plantas sintomáticas para maximizar la probabilidad de que el patógeno fuera detectado. Si no se encontraron plantas sintomáticas, en su lugar se tomaron muestras de plantas asintomáticas.

No se realizó un cálculo probabilístico de los tamaños de muestra y el método de recolección fue a través de muestreo intencional y selectivo, el cual consiste en escoger aquellas unidades que pueden proporcionar información esencial (plantas sintomáticas).

Como se evidenció en los anteriores trabajos, la tendencia fue la de no determinar los tamaños de muestra y los métodos de recolección a través de métodos estadísticos probabilísticos. En ningún caso se realizó muestreo para estimación ni para aceptación de lotes.

### 1.4.2. Antecedentes estadísticos

Se realizó una revisión de artículos relacionados con el uso y diseño de planes de muestreo de aceptación. En la búsqueda se encontró que algunos artículos se limitan al uso de tablas estándar preestablecidas y estos no fueron incluidos. Finalmente se realiza una descripción de los que consideramos más importantes para el desarrollo del trabajo. Los siguientes trabajos

se presentan en orden cronológico ascendente.

**Squeglia (2008)**
Desarrolló planes de muestreo con criterios de aceptación $c = 0$ que se derivan a partir de los planes ANSI Z1.4. Un plan ANSI Z1.4 consta de un tamaño de muestra $n$, y un número de aceptación $c$. El inspector verifica $n$ elementos y acepta el lote si se encuentran $c$ o menos defectos o no conformidades. Estos planes están diseñados para dar (aproximadamente) una probabilidad del 95 % de aceptación al nivel de calidad aceptable ($AQL$), que es uno de los parámetros para la selección del plan. El plan $c = 0$, por otro lado, rechaza el lote si se encuentran defectos o no conformidades, pero requiere un tamaño de muestra considerablemente menor.

Los planes desarrollados por el autor constan en convertir el plan ANSI a un plan $c = 0$ correspondiente, siguiendo los siguientes pasos:

1. Defina el plan ANSI Z1.4 sobre la base de a) el tamaño de lote $N$; b) el nivel de inspección; y c) el nivel de calidad aceptable ($AQL$).

2. Se obtiene el nivel de calidad rechazable ($RQL$) correspondiente. Los planes ANSI Z1.4 no tienen niveles de calidad rechazables ($RQL$) formales, pero pretenden que el $RQL$ es la fracción no conforme ($p$) para la cual la probabilidad de aceptación, o riesgo del consumidor ($\beta$), es del 10 %.

3. Calcule el tamaño de muestra mínimo necesario para obtener una probabilidad de aceptación del 10 % o menos en el $RQL$ para un número de aceptación de cero. La formula para encontrar los tamaños de muestra se deduce a partir de la distribución binomial, la cual es una buena aproximación de la distribución hipergeométrica cuando los tamaños de lote son grandes. Para lotes pequeños la aproximación puede ser imprecisa.
$$n = \frac{ln(\beta = 0{,}1)}{ln(1 - RQL)}$$

Finalmente, realiza una comparación entre el muestreo de aceptación y rechazo para atributos por el método ANSI Z1.4 y los planes de muestreo $c = 0$, dichas comparaciones se realizan en términos de tamaños de muestra, curvas características de operación y del AOQ (Calidad Promedio de Salida) y AOQL (Máximo porcentaje de defectuosos esperado). Concluye que el método propuesto en comparación con el método ANSI Z1.4 protege más al consumidor, siendo este método más estricto a la hora de aceptar lotes con cantidades "grandes" de defectuosos. El método por otra parte "castiga" al productor, ya que si este no tiene una calidad cercana al 100 %, tiende a rechazar muchos más lotes.

**White et al. (2009)**

Ilustran cómo las técnicas y perspectivas del muestreo de aceptación de atributos se pueden adaptar a la verificación de los requisitos de diseño probabilístico utilizando la simulación de Monte Carlo. La simulación estocástica es un pilar en el análisis de sistemas complejos, donde el comportamiento de un sistema se caracteriza en parte por la incertidumbre. En una simulación estocástica, las salidas dependen no solo de la lógica del modelo y el estado actual del sistema, sino también de los valores asumidos por las entradas representadas por variables aleatorias. El análisis de salidas de la simulación estocástica, se lleva a cabo en el marco del muestreo de Monte Carlo, una extensa colección de técnicas para generar muestras aleatorias computacionalmente y emplear estas muestras para resolver problemas.

Por analogía, un modelo de simulación estocástica es un "proceso de producción" capaz de "entregar artículos", donde en este caso los artículos son el resultado de ensayos de simulación. El método de Monte Carlo es un procedimiento para "inspeccionar" aleatoriamente una muestra finita de estos elementos con el fin de verificar un requisito de rendimiento, basado en la proporción mínima permitida de ensayos de simulación que exhiben el rendimiento de salida deseado. La inspección al 100 % es imposible, porque esto normalmente requeriría un número infinito de repeticiones. Por lo tanto, bajo esta analogía el muestreo de aceptación se aplica igualmente bien a la simulación estocástica.

Para su aplicación, consideraron los requisitos expresados como estándares límite, especificando el indicador de rendimiento para los ensayos de Monte Carlo conformes; la proporción límite mínima de ensayos conformes; y el riesgo máximo de aceptar un diseño no conforme, los cuales corresponden en términos propios al nivel de calidad rechazable ($RQL$) y el riesgo del consumidor ($\beta$). Para tales requisitos, un plan de muestreo de atributos prescribe el número de réplicas de simulación que deben ejecutarse y el número de réplicas no conformes que no pueden superarse.

Como ejemplo, utilizaron la derivación y el análisis de los planes de aceptación de atributos para el requisito de entrega en masa para el Programa de Constelaciones (CxP) de la NASA. Cx es el próximo programa espacial tripulado de la NASA, donde la visión es enviar exploradores humanos a la Luna y a Marte. Los requisitos de entrega se verificaron mediante simulaciones de vuelo, incluyendo dispersiones en propiedades de masa, rendimiento del motor, parámetros de guía, navegación y control, y parámetros ambientales. La verificación se considerará exitosa cuando el análisis muestre que la capacidad calculada de entrega en masa de la arquitectura de constelación es igual o mayor que el requisito de entrega en masa para $100\rho\,\%$ de las simulaciones con $100(1-\beta)\,\%$ confianza. Finalmente, los planes de muestreo entregan la cantidad de corridas o simulaciones requeridas ($n$) y la cantidad máxima permitida ($c$) de corridas no exitosas para aceptar un diseño propuesto.

Se concluyó que el muestreo de aceptación es un marco analítico bien documentado y

estadísticamente válido para verificar el desempeño con respecto a los estándares límite utilizando el muestreo estocástico.

**Luca et al. (2020)**
Desarrollan y presentan una herramienta web `https://www.acceptancesampling.com/` para estudiar planes de muestreo en una y dos etapas. Los planes de muestreo diseñados se basan en exigir que la curva característica de operación pase por dos puntos designados. En términos generales, se busca el tamaño de muestra ($n$) y el criterio de aceptación ($c$) que garanticen que el riesgo del productor y del consumidor, para un nivel de calidad aceptable ($AQL$) y rechazable ($RQL$) respectivamente, estén por debajo de los niveles predefinidos $\alpha$ y $\beta$, respectivamente. Para buscar esta combinación $(n, c)$ existen dos enfoques: 1) realizar una búsqueda exhaustiva para encontrar las combinaciones apropiadas o, 2) procedimientos de optimización que minimizan alguna función de costo. En este caso se presentan nuevas rutinas de búsqueda para diseñar planes para inspección por atributos y variables.

La herramienta web es totalmente interactiva y está disponible gratuitamente. Esta se basa en el lenguaje PHP y la librería HTML Bootstrap, además se derivan propiedades analíticas para apoyar el desarrollo de estrategias de búsqueda para el diseño de planes de muestreo de doble etapa que sean más eficientes y precisos en comparación con las rutinas existentes. También se presentan varios casos de estudio en los cuales se hace uso de la aplicación web.

En los anteriores trabajos se evidencia que los planes de muestreo de aceptación presentan un buen desempeño para verificación en cualquier contexto. En particular, los planes $c = 0$ poseen múltiples ventajas, por ejemplo, tamaños de muestra inferiores y protegen más al consumidor que los planes estándar. Finalmente, construir una herramienta web es una idea atractiva para resolver este tipo de problemas, ya que facilita los cálculos requeridos y es muy útil cuando se desea trabajar con resultados exactos y no con aproximaciones (tablas o métodos preestablecidos).

# 2. Marco Teórico

En esta sección se presenta el marco teórico de la investigación. En la primera parte se muestra el marco contextual, en el cual se incluyen algunas definiciones y conceptos importantes que ayudarán en la contextualización con el problema y a entender la importancia del presente trabajo en este sector de la industria agrícola. En la segunda parte se presenta lo concerniente a los temas o definiciones estadísticas, las cuales conforman una base de la teoría y herramientas con las cuales se buscará resolver el problema planteado.

## 2.1. Marco Contextual

Se realizó una búsqueda en la literatura con el fin de incluir la mayoría de conceptos y definiciones importantes que juegan un papel fundamental en el contexto del problema. Aquí se incluyen definiciones sobre los cultivos de cítricos, su producción, sus especies y las respectivas enfermedades, además de las normas que actualmente rigen en la producción y mantenimiento de estas especies.

**Cítricos**

Los cítricos designan las especies de grandes arbustos o arbolillos perennes (entre 5 y 15 m) cuyos frutos o frutas, poseen un alto contenido en vitamina C y ácido cítrico. Los cítricos pertenecen a la familia *Rutaceae* y se encuentran agrupados en la subfamilia *Aurantioideae*. Los géneros más importantes son: *Citrus*, *Poncirus* y *Fortunela*. Las especies del género *Citrus* son las más importantes desde el punto de vista agronómico y representan casi la totalidad de los cítricos cultivados (Rodríguez & Cagua 2012).

**Clasificacón de los cítricos**

El género *Citrus* ha sido clasificado por los taxónomos de diferentes maneras. Normalmente se utiliza la clasificación de *Swingle*. Las especies más conocidas y cultivadas son las siguientes:

- *Citrus aurantifolia* (Christon.) Swing. Conocido en el comercio internacional como lima mejicana, y en Colombia, como limón pajarito o de Castilla, aunque botánicamente es una lima ácida.
- *Citrus latifolia*. Lima Tahití

- *Citrus aurantium*. Naranjo amargo
- *Citrus grandis*. Pomelo
- *Citrus limon*. Limón verdadero
- *Citrus paradisi*. Toronja
- *Citrus reticulata*. Mandarina
- *Citrus sinensis*. Naranjo dulce

### Normativa para el cultivo de cítricos en Colombia

La resolución 12816 (ICA 2019) es la norma por medio de la cual se establece "los requisitos para el registro de los viveros y/o huertos básicos productores y/o comercializadores de semilla sexual y/o asexual (material vegetal de propagación) de cítricos, así como los requisitos fitosanitarios para a conservación, producción, certificación y distribución de material de propagación de cítricos en viveros, en el territorio nacional". En esta norma se dan un conjunto de definiciones agronómicas y se establecen los requisitos formales y de infraestructura que deben tener los viveros para registrarse ante el ICA. De esta norma se resaltan los siguientes conceptos relevantes para el desarrollo de este trabajo:

- Vivero: Área de terreno delimitada para propagar semillas de cítricos.
- Semilla: Es el óvulo fecundado y maduro o cualquier otra parte vegetativa de la planta que se use o pretenda ser usado para la siembra y/o propagación, sin importar que se encuentre identificada o tratada.
- Categoría genética: Semilla producida resultante de un programa de fitomejoramiento por el obtentor o el mejorador que desarrolla un cultivar y que se utiliza para desarrollar el cultivar o producir la semilla básica.
- Categoría básica o Bloque de fundación: Es la semilla obtenida a partir de la semilla genética, producida bajo la supervisión de un fitomejorador o entidad creadora del cultivar.
- Categoría registrada o bloque de multiplicación: Es la obtenida a partir de la semilla genética o de fundación.
- Categoría certificada o Bloque de multiplicación masal: Es aquella proveniente de semilla básica o de semilla registrada.

- Huerto básico asexual: Grupo de plantas madres con madurez fisiológica, con estabilización de producción y plenamente identificadas con calidad genética y sanitaria de las cuales se obtendrá varetas y/o yemas para injertación.
- Huerto básico sexual: Grupo de plantas madres con madurez fisiológica, con estabilización de producción y plenamente identificadas con calidad genética y sanitaria de las cuales se obtendrá semilla sexual para el porta-injero o patrón.
- Injertar: Método de propagación vegetativa que consiste en unir dos o más partes de plantas distintas, una parte arraigada o porta injerto y una o más partes aéreas o injertos, mediante técnicas varias, de manera que crezcan y se desarrollen como si fuesen una sola planta.
- Patrón o porta-injerto: Planta que sirve de soporte al clon o copa, constituyendo parte del tronco y la totalidad del sistema radicular.
- Plántula: Son los individuos con destino al establecimiento de cultivos, provenientes de un órgano reproductivo sexual o asexual y que para efectos del presente trabajo de grado son considerados semillas para siembra.
- Vareta: Rama de un árbol de cítrico de la cual se van a extraer yemas para injertar.
- Yema: Brote de tejido meristemático con el potencial para originar hojas, tallos, flores o sus combinaciones y que se puede usar como injerto.

Las Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias (NIMF) utilizan exclusivamente las definiciones especificadas en la (*NIFM n.5 Glosario de Términos Fitosanitarios* 2017), la cual nos aporta los siguientes conceptos importantes para el desarrollo de este proyecto:

- Lote: Conjunto de unidades de un solo producto básico, identificable por su composición homogénea, origen, etc.
- Plaga: Cualquier especie, raza o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales.
- Prueba: Examen oficial, no visual, para determinar la presencia de plagas o para identificar tales plagas.

**Enfermedades en los cítricos**

En Colombia los cultivos de cítricos pueden ser atacados por varias especies de insectos y ácaros dañinos, que afectan el desarrollo de los árboles, limitan su producción y disminuyen

la calidad de la fruta. Los costos de las prácticas utilizadas para controlar y evitar los daños causados por plagas, influyen en la rentabilidad económica de las explotaciones citrícolas comerciales. Algunas de las enfermedades más frecuentes y de mayor cuidado son:

- Virus de la tristeza: El virus de la tristeza de los cítricos (Citrus tristeza virus, CTV) causa una de las enfermedades más dañinas de este cultivo. Se refiere al decaimiento observado en muchas especies de cítricos injertados sobre patrones de Citrus aurantium (naranjo amargo) o de Citrus limon (limonero); algunas cepas del CTV inducen otros síndromes, como acanaladuras o picado del tallo, enanismo, menor productividad y baja calidad del fruto en muchos cultivares comerciales,incluso en ejemplares injertados sobre patrones tolerantes a la tristeza.

  El CTV se transmite con facilidad a nivel experimental al injertarse sobre cítricos sanos material vegetal infectado por el virus. Lo transmiten de forma natural y semipersistente ciertas especies de áfidos. El vector más eficaz del CTV en todo el mundo es T. citricida. *NIFM n.27 Anexo 15: Virus de la tristeza de los cítricos* (2016)

- Huanglongbing(HLB): Es una de las enfermedades más peligrosas y temidas por las pérdidas productivas y económicas que ocasiona. Las plantas jóvenes afectadas no entran nunca en producción y las plantas adultas dejarán de producir pocos años después de que se manifiesta la enfermedad. En las plantas de vivero infectadas, los síntomas pueden ser esporádicos e inconsistentes aunque un porcentaje alto de plantas se encuentren contaminadas. Faggiani (2009)

- Leprosis: La leprosis de los cítricos es una de las enfermedades económicamente más importantes de la industria cítrica brasileña. Se caracteriza por la presencia de lesiones locales en frutos, hojas y ramitas o ramas, que reducen directamente la producción y la vida útil de las plantas de cítricos. El agente etiológico es el virus de la leprosis de los cítricos C (CiLV-C) transmitido por los ácaros tenuipalpidos del género Brevipalpus. Bastianel et al. (2010)

- Exocortis: Es una enfermedad producida por el viroide de la exocortis de los cítricos (CEVd), un agente patógeno mucho más pequeño que los virus. Se caracteriza por la aparición de escamas y grietas verticales en la corteza, manchas amarillas en los brotes tiernos y enanismo, en especies sensibles. El CEVd se transmite por propagación mediante injerto y/o enraizamiento. No hay evidencia de transmisión de semillas en cítricos, pero la transmisión mecánica puede ser bastante eficiente.

  Las pérdidas económicas se deben fundamentalmente a las bajas producciones que se obtienen en los árboles enfermos que alcanzan un tamaño inferior al esperado. Aunque la calidad de la fruta no suele verse afectada, las pérdidas en producción pueden ser de hasta un 60 %. El efecto es muy superior en árboles que se han infectado en vivero o en propagaciones llevadas a cabo por el agricultor utilizando yemas infectadas, que en árboles que se infectan durante el cultivo. Duran-Vila (2017)

- Psorosis: La psorosis es una enfermedad devastadora a nivel mundial de los cítricos causada por un opiovirus filamentoso infeccioso, el virus de la psorosis cítrica(CPsV), que causa pérdidas anuales de alrededor del 5 % y una disminución progresiva de los árboles al afectar los tejidos conductores. La enfermedad puede ser asintomática en muchas especies de cítricos. En el campo, los síntomas más característicos de la enfermedad en los árboles adultos son la descamación de la corteza en el tronco y las ramas principales y también la tinción interna en la madera subyacente. Achachia et al. (2014)

- Cachexia - Xyloporosis: En el año 1928 se informó una enfermedad que afectaba al patrón lima dulce (Citrus limettioides Tan.) en Palestina y en 1934 se le dió el nombre de xyloporosis, atendiendo a la presencia de poros o agujeros en el xilema de las plantas infectadas. Por otra parte, en 1950 en Florida se describió una enfermedad similar afectando el tangelo "Orlando" (Citrus reticulata Blanco x Citrus paradisi Macf.) la cual se denominó cachexia. Ambos desórdenes fueron considerados por muchos años como provocados por virus, hasta que en 1986 se demostró que era causado por viroides (CVd-IIb y CVd-IIc) y se propuso denominarle viroide de la cachexia de los Cítricos (CCaV), aunque en algunos lugares aún prevalece el nombre de xyloporosis.

  El síntoma más característico es la aparición de agujeros en el xilema "pitting" y crestas en la cara cambial de la corteza con impregnación de goma de color pardo oscuro o amarillento. Acompañan el cuadro sintomático una considerable reducción del crecimiento del árbol, follaje clorótico, hojas pequeñas, defoliación y frutos de menor tamaño. Se transmite principalmente por medio de injertos, al tomar yemas procedentes de árboles contaminados; en Cuba se demostró bajo condiciones experimentales la efectividad en la transmisión a través de las herramientas de corte contaminadas en diferentes especies cítricas. Duran-Vila (1997)

### Normativa para la verificación de cultivos de cítricos

En la resolución 12816 (ICA 2019) también se establecen los requisitos para la certificación y distribución de material de propagación de cítricos en viveros.

En el paragrafo 2 de esta norma se establece: "*Para la producción (multiplicación) de yemas, patrones y plantas de viveros de cítricos, se deberá realizar análisis obligatorios ante laboratorios del ICA o autorizados para la detección de los problemas sanitarios: Tristeza, Exocortis, Huanglongbing, para los cuales no se permite ninguna tolerancia en las diferentes categorías*". Los análisis de laboratorio se realizarán por muestreo, de acuerdo a lo establecido en la tabla **2-1**.

Algunos inconvenientes de esta normativa son:

**Tabla 2-1**.: Verificación fitosanitaria de plagas y porcentajes de muestreo para especies cítricas.

| **Problema Sanitario** | **Genética** | **Básica** | **Registrada** | **Certificada** |
|---|---|---|---|---|
| Tristeza (CTV) | Una vez al año, 100 % del material. | Una vez al año, 100 % del material. | Una vez al año, 2 % del material. | Una vez al año, 0.2 % del material. |
| Exocortis (CEVd) | Una vez cada 3 años, 100 % del material. | Una vez cada 3 años, 100 % del material. | Una vez al año, 5 % del material. | Una vez al año, 0.1 % del material. |
| Huanglongbing (HLB) | Una vez al año, 100 % del material. | Una vez al año, 100 % del material. | Una vez al año, 5 % del material. | Una vez al año, 0.1 % del material. |

**Fuente:** Resolución 12816, ICA (2019).

1. No ha sido valorada estadísticamente. Dada la falta de información sobre el método y los parámetros utilizados para la construcción de estos porcentajes de muestreo, las probabilidades de error (aceptar lotes infectados) no han sido cuantificadas, es decir, se desconoce el desempeño de estos planes de muestreo.

2. Para lotes grandes, muestrear un porcentaje fijo del lote puede ser muy costoso. Un porcentaje de muestreo fijo ($p\,\%$), requiere que se tomen $N * p\,\%$ plantas en la muestra. Es evidente que cuando aumenta el tamaño del lote $N$ en una unidad, el tamaño de muestra aumentará en $p$ unidades, esto genera sobrecostos innecesarios, dado que no hay una convergencia o estabilización de los tamaños de muestra, estos siguen creciendo indefinidamente. Por ejemplo, bajo un plan de muestreo a proporción fija del 2 %, si se tiene un lote de 50000 plantas, se deberán muestrear $50000 * 0{,}02 = 1000$ plantas. Esto es imposible dadas las restricciones económicas y probablemente sea innecesario muestrear dicha cantidad para asegurar un riesgo de consumidor. Esto indica que los planes de muestreo de esta normativa no son necesariamente óptimos.

3. Para lotes pequeños, muestrear un porcentaje fijo puede ser insuficiente, el riesgo de aceptar lotes con virus puede ser alto. Teniendo en cuenta la situación del ítem anterior, en este caso supongamos que se tiene un lote de solo 500 plantas, el muestreo bajo el mismo porcentaje indica que se debe tomar un total de $500 * 0{,}02 = 10$ plantas. Como se mencionó en el ítem 1, esta cantidad de plantas en la muestra pueden tener asociado un error considerable. Por ejemplo; para detectar lotes que estén infectados al 5 % el riesgo es de 59.58 %, posteriormente se explicará en detalle el calculo realizado. Esto puede suceder porque el tamaño de muestra probablemente no sea suficiente para asegurar que salga por lo menos una planta infectada en la muestra.

## 2.2. Marco Estadístico

En esta sección se incluyen los conceptos referentes a teoría o definiciones tanto matemáticas como estadísticas que se requieren para comprender la propuesta metodológica planteada. Se incluyen definiciones de los diferentes tipos de muestreo, el diseño y uso del muestreo de aceptación y las diferentes distribuciones y parámetros que las definen, además de algunas medidas de desempeño que evalúan la bondad del diseño de muestreo propuesto. Finalmente, se presentan estrategias de selección de la muestra que se podrían aplicar en campo.

**Muestreo**
Es el proceso mediante el cuál se extrae un conjunto de unidades o individuos de una población. Existen dos enfoques de muestreo dependiendo de su finalidad, el muestreo para estimación y el muestreo para aceptación.

**Muestreo para estimación**
Se utiliza cuando a partir de una muestra, seleccionada mediante un determinado método de muestreo, se *estiman* las características poblacionales (media, total, proporción,etc.) con un error cuantificable y controlable. Las estimaciones se realizan a través de funciones matemáticas de la muestra denominadas estimadores, que son variables aleatorias al considerar la variabilidad de las muestras. Los errores se cuantifican mediante varianzas, desviaciones típicas o errores cuadráticos medios de los estimadores, que miden la precisión de los mismos (Pérez 2010).

**Muestreo para aceptación**
Un muestreo de aceptación consiste en evaluar un colectivo homogéneo a través de una muestra aleatoria, para decidir la *aceptación* o el *rechazo* del colectivo. Por tanto es necesario tener presente en todo momento que, en un muestreo, lo que se está evaluando es toda la población y no sólo la muestra, por lo que la cuestión es si una población, con las características inferidas a partir de los datos de la muestra observada, es aceptable o no. Rojas (2006)
El procedimiento estadístico del muestreo de aceptación se basa en la metodología de la prueba de hipótesis. Las hipótesis nula y alternativa son las siguientes:

$$H_0 : \textit{La calidad del lote es aceptable}$$

$$H_a : \textit{La calidad del lote es no aceptable}$$

El muestreo de aceptación puede dividirse en dos tipos fundamentales dependiendo de la característica observada:

- Muestreo por atributos: cuando en la inspección las unidades se dividen en conformes o no conformes, según cumplan con un conjunto de requerimientos.
- Muestreo por variables: cuando en la inspección se mide una variable cuantitativa como longitudes, pesos,etc., y se evalúa la distancia entre dicha cantidad y la requerida en las especificaciones.

Este trabajo se enfoca en el muestreo para aceptación, ya que como se mencionó en el planteamiento del problema, se necesita decidir si un lote de plantas puede ser catalogado como aceptable o no, a partir de la muestra seleccionada y evaluada, es decir, no es de nuestro interés estimar la proporción de plantas infectadas en el lote. Además, dado que los resultados de laboratorio indican si la planta presenta la infección o no, esto es un resultado dicotómico (conforme/ no conforme), este problema es por atributos.

En el muestreo de aceptación por atributos, el número de unidades no conformes ($D$) en una muestra de $n$ unidades se puede modelar, de forma exacta o aproximada, a través de cuatro distribuciones de probabilidad, dependiendo del tamaño del lote (grande o pequeño). La distribución Hipergeométrica modela esta variable de forma exacta y las distribuciones Binomial, Poisson y Normal son aproximaciones prácticas para la modelación.

- Distribución hipergeométrica: La distribución hipergeométrica es fundamental para gran parte del muestreo de aceptación. Esta genera soluciones exactas y su uso es obligatorio cuando se muestrea un lote finito o pequeño sin reemplazo, dado que las aproximaciones no serán buenas. Su función de probabilidad es:

$$P(D = d) = \frac{\binom{N_d}{d}\binom{N_{nd}}{n-d}}{\binom{N}{n}}, \tag{2-1}$$

  donde;
  $N$ es el tamaño del lote, $N > 0$
  $N_d$ es el número de unidades no conformes en el lote.
  $N_{nd}$ es el número de unidades conformes en el lote.
  $n$ es el tamaño de la muestra, $n = 1, 2, \ldots, N$
  $d$ es el número de unidades no conformes en la muestra, $d = 0, 1, 2, \ldots, n$

- Distribución binomial: Es la distribución más utilizada en el muestreo de aceptación. Es un buena aproximación de la distribución hipergeométrica, cuando se muestrea una característica de atributo de un lote (o proceso) infinito o grande ($n/N < 0{,}1$), o un lote finito cuando se toma una muestra con reemplazo. Su función de probabilidad es:

$$P(D = d) = \binom{n}{d} p^d \, (1-p)^{n-d} = \binom{n}{d} p^d \, q^{n-d}, \tag{2-2}$$

donde;
$n$ es el tamaño de la muestra, $n \in n^+$
$p$ es la proporción de unidades no conformes en el lote, $0 \leq p \leq 1$
$q$ es la proporción de unidades conformes en el lote, $q = 1 - p$
$d$ es el número de unidades no conformes en la muestra, $d = 0, 1, 2, \ldots, n$

- Distribución Poisson: La distribución de Poisson se usa para planes de muestreo que involucran el número de no conformidades o no conformidades por unidad en lugar del número de piezas no conformes. También se usa para aproximar las probabilidades binomiales que involucran el número de partes no conformes cuando la muestra $(n)$ es grande $(n/N < 0{,}1)$ y $p < 0{,}1$ es muy pequeña y además se cumple que $np < 5$. Su función de probabilidad es:

$$P(D = d) = \frac{\lambda^d \, e^{-\lambda}}{d!}, \tag{2-3}$$

donde;
$\lambda$ es el número esperado de no conformidades por unidad, $\lambda > 0$
$d$ es el número de ocurrencias, $d = 0, 1, 2, \ldots$

- Distribución Normal: Cuando el muestreo de aceptación se realiza sobre un tamaño de lote suficientemente grande $(n/N < 0{,}1)$ y una fracción de unidades no conformes $p \geq 0{,}1$ y además se cumple que $np > 5$ , entonces la aproximación normal puede ser utilizada para modelar la distribución Binomial:

$$B(n, p) \sim N(np, \sqrt{npq}) \tag{2-4}$$

**Parámetros de diseño de un plan de muestreo de aceptación**
En el muestreo de aceptación de lotes, se deben definir ciertos parámetros que determinan las condiciones o requerimientos para el plan de muestreo, esos parámetros son:

- Tamaño del lote $(N)$: Es la cantidad de elementos de la población que se desea analizar.
- AQL (Acceptable Quality Level): Representa el nivel de calidad (medido en % de unidades no conformes) más bajo para el proceso del productor que el consumidor consideraría aceptable. El AQL generalmente no pretende ser una especificación del producto, ni es un valor objetivo para el proceso de producción del productor. Es simplemente un estándar contra el cual juzgar los lotes. Se espera que el proceso del productor opere a un nivel de calidad que sea considerablemente mejor que el AQL.
- RQL (Rechazable Quality Level): Representa el nivel de calidad más pobre que el consumidor está dispuesto a aceptar en un lote individual. En otras palabras, es

el máximo porcentaje de unidades no conformes toleradas en un lote. Un lote que contenga mas de un RQL % de unidades no conformes debe ser rechazado.

Estos parámetros usualmente son definidos por el consumidor o en común acuerdo con el productor.

Después de definir las condiciones de calidad aceptables y rechazables ($AQL$, $RQL$), el plan de muestreo se especifica cuando se definen las siguientes variables de decisión:

- Tamaño de la muestra ($n$): Es la cantidad de unidades seleccionadas del lote que se inspeccionarán, y se clasificarán como conformes o no conformes.
- Número de aceptación ($c$): Es el número de unidades no conformes permitidas en una muestra de tamaño $n$, para que el lote sea aceptado. Este parámetro define el criterio para aceptar o rechazar el lote. Sea $d$ el número de unidades no conformes en la muestra, se acepta el lote si $d \leq c$.

**Indicadores de desempeño de los planes de muestreo**
Para identificar cuáles planes de muestreo funcionan mejor, es decir, bajo qué tamaños de muestra y número de aceptación se tiene un mejor poder de discriminación de lotes buenos y malos, se utilizan varios indicadores de desempeño, los cuales se deben comparar para determinar cuál es el mejor plan de muestreo. Estos indicadores son:

- Riesgo del productor: Se define como la probabilidad de que el procedimiento rechace un lote con buenas condiciones de calidad. Esto es:

$$Pr(rechazar|P = AQL) = \alpha \tag{2-5}$$

- Riesgo del consumidor: Se define como la probabilidad de que el procedimiento acepte un lote que no cumple con las condiciones mínimas de calidad. Esto es:

$$Pr(aceptar|P = RQL) = \beta \tag{2-6}$$

- Curva característica de operación: Es una representación gráfica del rendimiento de un plan de muestreo. Se crea trazando la probabilidad de aceptar el lote, para toda una gama de proporciones de unidades no conformes. Esta gráfica describe el grado en que un plan de muestreo permite distinguir entre los lotes buenos y los lotes malos. Paz & Gómez (2000)

  Estadísticamente, la curva de operación se construye encontrando las probabilidades de aceptar el lote, asumiendo diferentes proporciones de unidades no conformes o

infectadas en nuestro caso, es decir, para cada proporción real de unidades no conformes $P$ asumida, se calcula

$$Pa = Pr(d \leq c|0 < P < 1) \tag{2-7}$$

Se definen dos curvas de operación, curva de operación tipo A y tipo B.

- Tipo A: La curva tipo A viene dada por la probabilidad de aceptar un lote para distintos valores de $P$, calculada a partir de la función de probabilidad de la distribución Hipergeométrica. Esta se utiliza para lotes de tamaño finito.
- Tipo B: La curva tipo B viene dada por la probabilidad de aceptar un lote cuyo tamaño supera por lo menos 10 veces a la muestra, dicha probabilidad se calcula a partir de la función de probabilidad de la distribución Binomial. Esta se utiliza para lotes grandes o continuos ($n/N < 0{,}1$). Esta curva tipo B también se puede calcular a partir de la distribución Poisson o Normal, utilizando las aproximaciones correspondientes.

Se debe tener en cuenta que cuando el tamaño del lote es por lo menos 10 veces el tamaño muestral, las curvas tipo A y tipo B no se diferencian. En estos casos se podría utilizar cualquiera de las dos distribuciones de referencia (Hipergeométrica y Binomial). De lo contrario pueden existir diferencias notables, siendo la distribución hipergeométrica el modelo adecuado para evaluar las probabilidades.

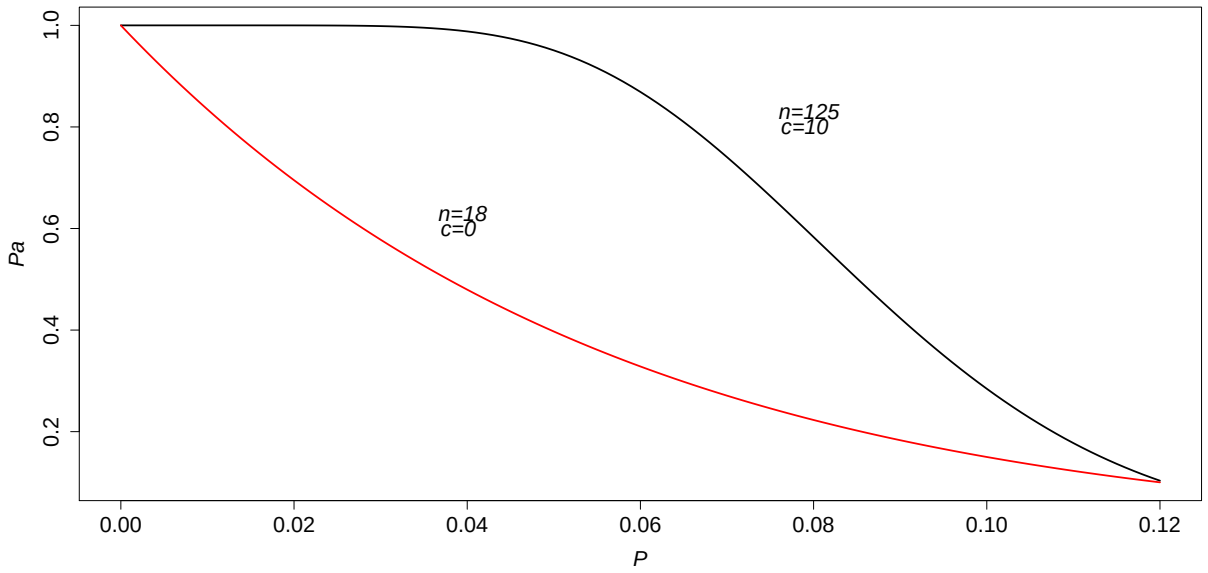



**Figura 2-1**.: Curvas de operación para lotes grandes. Calculo basado en distribución Binomial. Casos de ejemplo $(n = 125, c = 0)$ $(n = 18, c = 0)$.

La figura **2-1** muestra el efecto de los números de aceptación en las curvas de operación. Con el número de aceptación establecido en cero, se tiene una mayor protección en todas las proporciones de unidades no conformes ($p$) con un tamaño de muestra de 18, en comparación con un plan de muestreo que tiene un tamaño de muestra de 125 con un número de aceptación de 10. Se aprecia que las probabilidades de aceptar lotes con un porcentaje de no conformes entre 0 y 12 % siempre son menores o iguales para el plan de muestreo con número de aceptación cero. Esto implica que los riesgos para el consumidor de aceptar lotes de mala calidad son menores en planes $c = 0$ con tamaños de muestra más bajos.

- Average Outgoing Quality (AOQ): La calidad promedio de salida es la proporción promedio de unidades defectuosas entre aquellas unidades que superan el proceso de inspección. Este concepto es una forma de medir el efecto de un plan de muestreo sobre la calidad que se tendrá después de aplicarlo. Existen dos formas equivalentes de calcular el AOQ, dependiendo del tamaño del lote a evaluar.
  - Fórmula exacta: Se utiliza para lotes de tamaño finito.

$$AOQ = P_a P \left(1 - \frac{n}{N}\right) \tag{2-8}$$

  - Fórmula aproximada: Se utiliza para lotes grandes ($n/N < 0{,}1$) o continuos.

$$AOQ = P_a P \tag{2-9}$$

  Este indicador supone que se ha tomado la siguiente práctica antes de liberar un lote:
  - Todas las unidades no conformes encontrados en muestras de lotes aceptados se reparan o reemplazan con un buen producto.
  - Todas las unidades no conformes en lotes rechazados se reparan o reemplazan con un buen producto (esto incluye todas las unidades no conformes encontradas durante la inspección de la muestra y durante la inspección de la porción restante del lote; todos los lotes rechazados deben ser inspeccionados al 100 % para que se apliquen las ecuaciones 2-8 y 2-9 ).
- Average Outgoing Quality Limit(AOQL): La máxima calidad promedio de salida, se interpreta como el peor nivel de calidad promedio, que se espera de un lote que ha pasado por el proceso de muestreo de aceptación. Se encuentra como:

$$AOQL = max(AOQ) \tag{2-10}$$

La figura **2-2** muestra el efecto de los números de aceptación en la curva AOQ

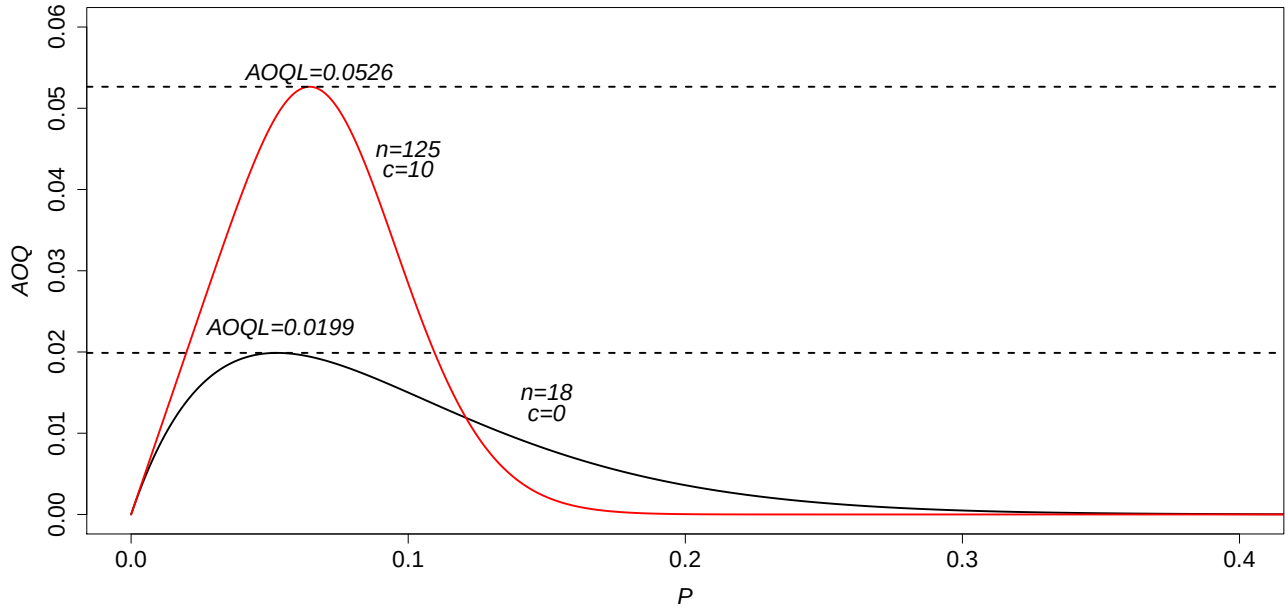



**Figura 2-2**.: Curvas AOQ y AOQL. Casos de ejemplo $(n = 125, c = 0)(n = 18, c = 0)$.

y en el valor AOQL. Se observa que la máxima calidad promedio de salida es considerablemente mayor en el plan $(n = 125, c = 10)$. Con el criterio de aceptación en cero, el peor nivel de calidad promedio esperado es del 2 %, mientras que con el plan alternativo es de aproximadamente 5.3 %. Esto implica que bajo el plan de muestreo con $c = 0$, los lotes que pasen el proceso de verificación serán mejores en términos de calidad.

- Average Total Inspection (ATI): La inspección total promedio es el número esperado de piezas que se inspeccionan en un lote. Su valoración es importante en la estimación de los costos a largo plazo del procedimiento. Si un lote es de calidad $P$ y la probabilidad de aceptación es $P_a$, entonces la inspección total promedio por lote es:

$$ATI = n * P_a + N * (1 - P_a) \tag{2-11}$$

Lotes muy malos tendrán un comportamiento asintótico de la curva ATI, con asintota en el tamaño del lote, cuando este es finito. La figura 2.2 ilustra las curvas ATI de los planes $(n = 18, c = 0)$, y $(n = 125, c = 10)$. Como se observa ambas curvas convergen al tamaño de lote $(N = 10000)$ cuando la calidad del lote es más baja ($P$ es mayor). Este indicador se usa solo cuando un lote que se rechaza se inspecciona al 100 %.

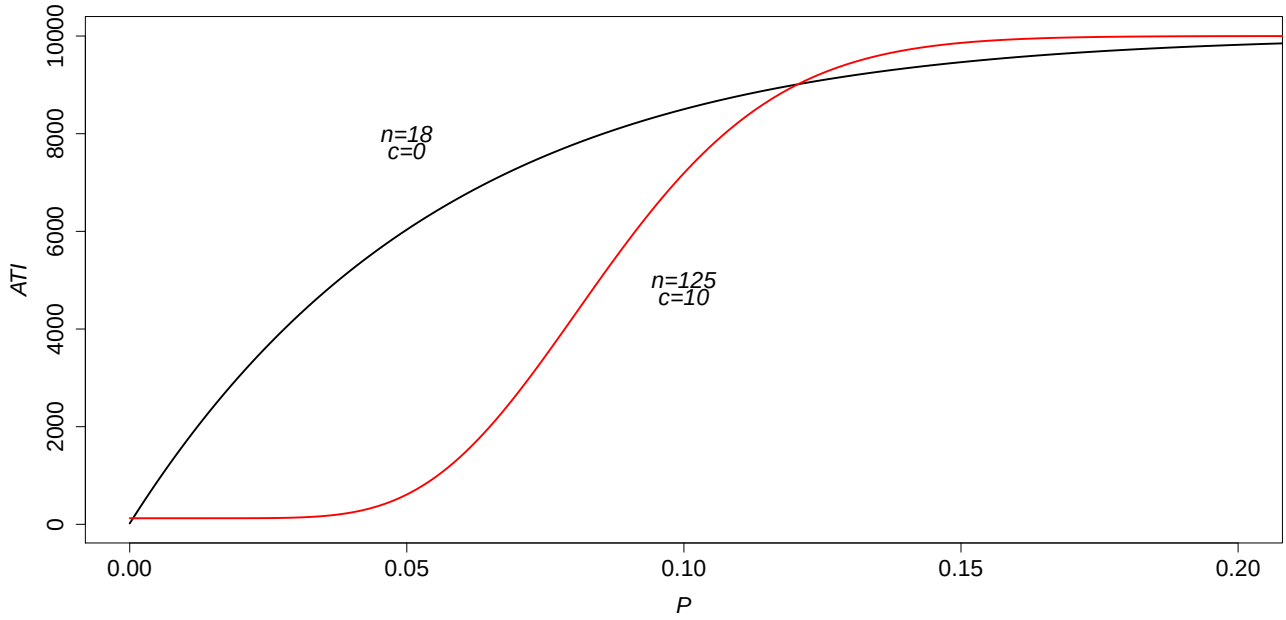



**Figura 2-3**.: Curvas ATI. Casos de ejemplo $(n = 125, c = 0)(n = 18, c = 0)$.

**Diseño de planes de muestreo simple**

Un enfoque habitual para el diseño de un plan de muestreo de aceptación consiste en exigir que la curva de operación pase por dos puntos designados. Por ejemplo, construir un plan de muestreo que cumpla que la probabilidad de aceptación para lotes con fracción no conforme $P = AQL$ sea $1 - \alpha$ y la probabilidad de aceptación para lotes con fracción no conforme $P = RQL$ sea $\beta$. En este caso, las parejas $(AQL, \alpha)$ y $(RQL, \beta)$ son los parámetros de diseño que establecen las condiciones de desempeño deseadas para el plan de muestreo. Estos cuatro parámetros deben ser definidos a priori por el usuario.

Suponiendo que el muestreo Binomial (con curvas OC tipo B) es apropiado, el tamaño de muestra $n$ y el número de aceptación $c$ es la solución para:

$$\begin{aligned} \sum_{d=0}^{c} \binom{n}{d} AQL^d (1 - AQL)^{n-d} &\geq 1 - \alpha \\ \sum_{d=0}^{c} \binom{n}{d} RQL^d (1 - RQL)^{n-d} &\leq \beta \end{aligned} \tag{2-12}$$

La ecuación 2-12 se obtuvo escribiendo los dos puntos en la curva OC utilizando la distribución Binomial. Las dos ecuaciones simultáneas en la ecuación 2-12 son no lineales y no existe una solución simple y directa.

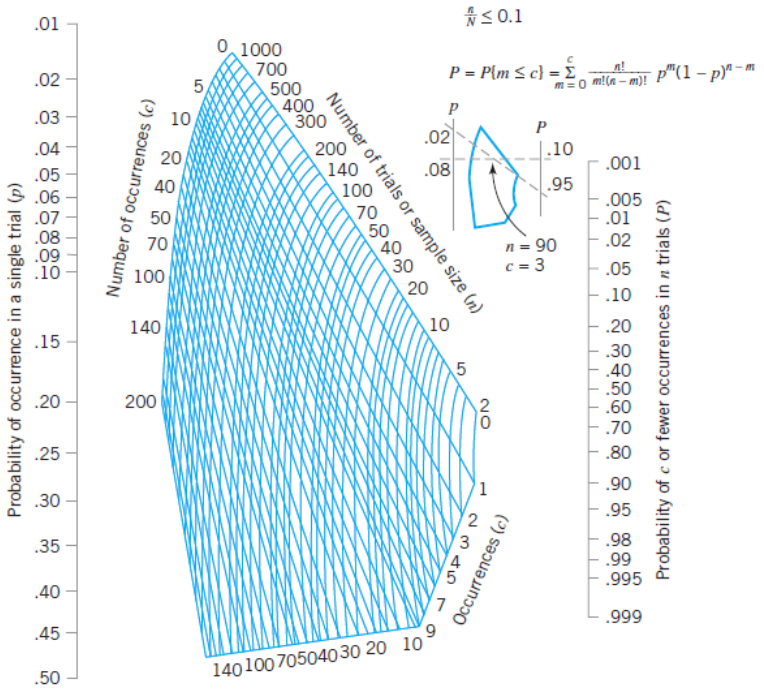



**Figura 2-4**.: Nomograma Binomial.
**Fuente:** Mongtomery, D. (2009), Introduction to statistical quality control, 7th edn, Wiley, p 643.

El nomograma de la figura **2-4** ha sido utilizado a lo largo del tiempo para resolver estas ecuaciones. Consiste en dibujar dos lineas en el nomograma, una que conecta $P = AQL$ y $1 - \alpha$, y la otra que conecta $P = RQL$ y $\beta$. La intersección de estas dos lineas da la región del nomograma en la que se encuentra el plan de muestreo deseado. El uso de esta herramienta puede ser confuso y muy poco exacto. Note que si dos personas tienen los mismos requerimientos o valores de entrada para establecer el plan de muestreo, con un desvío mínimo en las rectas se pueden obtener planes totalmente diferentes, esto hace que esta herramienta en la actualidad no sea eficiente.

**Planes de muestreo para inspección de cero defectos**
Los planes "Aceptar en Ninguno" o "Cero defectos", comúnmente llamados $c = 0$, son planes de muestreo de lotes para datos de atributos diseñados de tal manera que si se encuentra un defecto en la muestra inspeccionada, el lote se rechaza. Los planes de muestreo $c = 0$ es un sistema RQL, es decir, protegen al consumidor. Si la calidad está en el nivel de calidad rechazable (RQL), se debe asegurar de rechazar el lote.

Estos planes tienen ventajas y desventajas con respecto a la inspección tradicional de lotes donde generalmente tiene un número de aceptación ($c$) mayor que cero. Algunas de las ventajas son:

1. Debido a que no se acepta ningún lote si hay un defecto en la muestra, se preserva la percepción de calidad tanto para el consumidor como para el inspector.

2. Es más sencillo de administrar. En casos donde la inspección es visual o sencilla de realizar, se puede dar que no sea necesario analizar los $n$ artículos de la muestra, dado que cuando encuentre el primer no conforme, puede omitir los restantes y rechazar todo el lote.

3. Para lotes con niveles de no conformes reales mayores que 0 pero menores que el RQL, el enfoque $c = 0$ probablemente rechazará el lote (protege al consumidor).

4. Requiere solo un nivel de calidad rechazable (RQL) designado, no se especifica el nivel de calidad aceptable (AQL).

5. Si la calidad es cercana al 100 %, los planes $c = 0$ darán como resultado que se inspeccionen menos piezas en total.

Algunas de las "desventajas" son:

1. Si se requiere establecer un nivel de calidad aceptable (AQL$>$ 0), un plan estándar teóricamente aceptaría la mayoría de veces lotes con un porcentaje de defectuosos igual o menor al AQL, mientras que el plan $c = 0$ rechazaría con mayor frecuencia dichos lotes. Esto perjudica al productor, ya que se rechazarían lotes buenos en mayor proporción.

2. Si la calidad no está cerca del 100 %, los planes $c = 0$ generarán más lotes rechazados.

3. Requiere un RQL cuidadosamente elegido.

Note que en este contexto, las desventajas expuestas se convierten en ventajas. Como ya se mencionó, por los métodos de transmisión, aceptar un lote con algunas plantas infectadas puede poner en riesgo todo el lote completo y con ello, se afecta la producción y se pierden grandes recursos económicos y logísticos. Teniendo en cuenta esto, se requiere que la calidad de los lotes sea muy cercana al 100 % y minimizar las posibilidades de que un lote malo sea aceptado (riesgo del consumidor).

La figura **2-5** muestra el comportamiento de las curvas de operación para planes $c = 0$ y diferentes tamaños de muestra. Suponga que la linea de referencia vertical corresponde al nivel de calidad rechazable $RQL = 0.02$, esto implica que los lotes con un porcentaje de infectadas de 2 % o más, deben ser rechazados. Observe que para tamaños de muestra bajos ($n = 20, 50$), la probabilidad de aceptar lotes con este nivel de calidad es de aproximadamente 0.65 y 0.35 respectivamente. Mientras que para tamaños de muestra altos ($n = 100, n = 200$),

esta probabilidad es de 0.13 y 0.02 aproximadamente. Esto muestra que para cierto nivel de calidad establecido, un tamaño de muestra mayor tiene menos posibilidad de aceptar lotes malos.

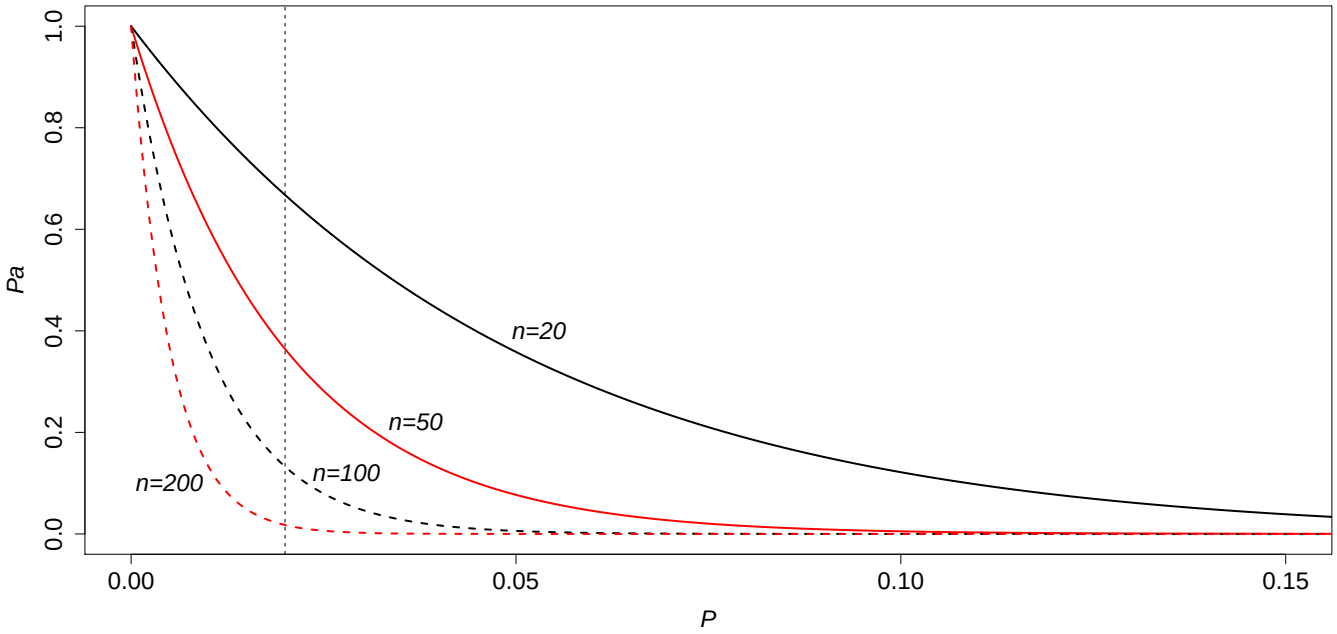



**Figura 2-5**.: Curvas de operación para planes de muestreo $c = 0$.

Teniendo que el número de aceptación está predeterminado a $c = 0$, las ecuaciones a resolver bajo la distribución Binomial se reducen a:

$$(1 - RQL)^n \leq \beta \tag{2-13}$$

La solución de la ecuación 2-13 va a ser el tamaño de muestra óptimo que cumpla con los requerimientos preestablecidos. Esta solución se va a encontrar de manera exacta utilizando herramientas computacionales, por lo tanto, la herramienta de computo final es un gran aporte, ya que evita el uso y calculo inexacto del nomograma, y se tiene la certeza que los resultados obtenidos por medio de ella son exactos y no se basan en aproximaciones ni dependen del usuario que la utilice.

**Planes de muestreo Squeglia**

Squeglia (2008) diseñó un conjunto de planes de muestreo estándar con número de aceptación cero. Se diseñaron y utilizaron originalmente para proporcionar una protección

igual o mayor al consumidor con menos inspección general que los planes de muestreo MIL-STD-105-E correspondientes. En el año 2000, el Departamento de Defensa declaró obsoleto a MIL-STD-105-E y recomendó utilizar los planes $c = 0$ diseñados por el autor, ya que además de las ventajas económicas, son fáciles de usar y administrar.

Nicholas Squeglia derivó los planes de muestreo del estándar Z1.4 (MIL-STD-105E). Constan en convertir el plan Z1.4 a un plan $c = 0$. Específicamente, convertir un AQL en un RQL y desde allí construir el plan de muestreo $c = 0$. El procedimiento de manera general fue descrito en la sección 1.4.2.

Estos planes de muestreo $c = 0$ redujeron en gran medida la complejidad asociada con Z1.4. Por ejemplo, el uso de varios niveles de inspección (normal, ajustada y reducida) que dependen del historial de calidad de cada proveedor; reglas de conmutación (para pasar de un nivel de inspección a otro); muestreo único y doble no se integraron en el procedimiento de Squeglia. La figura **2-6** presenta los planes de muestreo obtenidos. Estos planes requieren definir nivel de calidad aceptable y el tamaño del lote a evaluar. En la intersección de ambos, se encuentra el tamaño de muestra $n$.

**C = 0 SAMPLING PLANS**
**ASSOCIATED AQLS**

| | .010 | .015 | .025 | .040 | .065 | .10 | .15 | .25 | .40 | .65 | 1.0 | 1.5 | 2.5 | 4.0 | 6.5 | 10.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LOT SIZE | SAMPLE SIZE | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 TO 8 | **** | | | | * | * | * | * | * | * | * | * | 5 | 3 | 2 | 2 |
| 9 TO 15 | **** | | | | * | * | * | * | * | * | 13 | 8 | 5 | 3 | 2 | 2 |
| 16 TO 25 | **** | | | | * | * | * | * | * | 20 | 13 | 8 | 5 | 3 | 3 | 2 |
| 26 TO 50 | * | * | * | * | * | * | * | * | 32 | 20 | 13 | 8 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| 51 TO 90 | * | * | * | * | * | * | 80 | 50 | 32 | 20 | 13 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 |
| 91 TO 150 | * | * | * | * | * | 125 | 80 | 50 | 32 | 20 | 13 | 12 | 11 | 7 | 6 | 5 |
| 151 TO 280 | * | * | * | * | 200 | 125 | 80 | 50 | 32 | 20 | 20 | 19 | 13 | 10 | 7 | 6 |
| 281 TO 500 | * | * | * | 315 | 200 | 125 | 80 | 50 | 48 | 47 | 29 | 21 | 16 | 11 | 9 | 7 |
| 501 TO 1200 | * | 800 | 500 | 315 | 200 | 125 | 80 | 75 | 73 | 47 | 34 | 27 | 19 | 15 | 11 | 8 |
| 1201 TO 3200 | 1250 | 800 | 500 | 315 | 200 | 125 | 120 | 116 | 73 | 53 | 42 | 35 | 23 | 18 | 13 | 9 |
| 3201 TO 10,000 | 1250 | 800 | 500 | 315 | 200 | 192 | 189 | 116 | 86 | 68 | 50 | 38 | 29 | 22 | 15 | 9 |
| 10,001 TO 35,000 | 1250 | 800 | 500 | 315 | 300 | 294 | 189 | 135 | 108 | 77 | 60 | 46 | 35 | 20 | 15 | 9 |
| 35,001 TO 150,000 | 1250 | 800 | 500 | 490 | 476 | 294 | 218 | 170 | 123 | 96 | 74 | 56 | 40 | 29 | 15 | 9 |
| 150,001 TO 500,00 | 1250 | 800 | 750 | 715 | 476 | 435 | 270 | 200 | 156 | 119 | 96 | 74 | 40 | 29 | 15 | 9 |
| 500,001 AND OVER | 1250 | 1200 | 1112 | 715 | 556 | 345 | 303 | 244 | 189 | 143 | 102 | 64 | 40 | 29 | 15 | 9 |

*** Indicates entire lot must be inspected**
**NOTE: The Acceptance Number in all cases is ZERO**

**Figura 2-6**.: Planes de muestreo $c = 0$.
**Fuente:** Zero Acceptance Number Sampling Plans, 5th edition by Nicholas L. Squeglia. American Society for Quality.

**Estrategias de selección de la muestra**

Una vez se define el tamaño de la muestra y el criterio de aceptación, otro aspecto de gran importancia se relaciona con la definición de la estrategia de recolección de la muestra. Recordando que las medidas de desempeño del plan de muestreo , y por ende el plan óptimo, han sido deducidas bajo el supuesto de que se dispone de una muestra aleatoria, sin sesgo de selección. Debido a lo anterior, se incluyen en esta sección la descripción de algunas estrategias que pueden ser útiles para garantizar la aleatoriedad y facilitar operativamente la colección de las plantas, ademas de permitir identificar individualmente la posición de la planta que ha sido muestreada. Esto último para, en el caso de ser identificada, poder hacer una trazabilidad a la planta.

**Muestreo probabilístico**

- Muestreo Aleatorio Simple: Se trata de un procedimiento mediante el cual se seleccionan $n$ unidades de una población de tamaño $N$ de tal manera que cada muestra posible de tamaño $n$ tenga la misma probabilidad de ser seleccionada. Consiste en obtener la muestra unidad a unidad de forma aleatoria. Para ello existen múltiples alternativas, por ejemplo, tablas de números aleatorios, software generador de números aleatorios o incluso, métodos menos elaborados como extraer papeles de una bolsa sin observar; de esta manera todas las unidades de la población tendrán la misma probabilidad de ser seleccionadas.

  Este método de muestreo requiere listar y enumerar consecutivamente todas las unidades de la población para aplicar los métodos de selección mencionados anteriormente. Esto es una dificultad logística, ya que puede requerir de mucho tiempo, sobre todo en casos donde los lotes son considerablemente grandes y no se tienen identificadores únicos para cada unidad.

- Muestreo sistemático: El muestreo sistemático consiste en retirar una muestra de las unidades del lote a intervalos fijos y predeterminados. Sin embargo, la primera selección debe hacerse al azar en el lote. *NIMF n. 31 metodologías para muestreo de envíos* (2008)

  Por ejemplo, se necesita extraer una muestra de 10 plantas sobre un lote de 100. La primera planta seleccionada al azar es la número 3, a partir de esta, con un intervalo de $k = \frac{100}{10} = 10$ (para garantizar que se recorra todo el lote), se seleccionarán las próximas plantas hasta completar la muestra. Por lo que las próximas plantas serán la 13,23,33,etc.

  Este método de muestreo presenta múltiples ventajas. Permite obtener buenas

propiedades de representatividad, y es un sistema muy rápido y simple, ya que se evita la necesidad de generar número aleatorios como plantas en la muestra.

- Muestreo estratificado: El muestreo estratificado consiste en separar el lote en subdivisiones distintas (es decir, en estratos) para luego extraer unidades de muestra de todas y cada una de las subdivisiones. Dentro de cada subdivisión, las unidades de muestra se retiran utilizando un método particular (sistemático o aleatorio). En ciertos casos, se podrán tomar distintos números de unidades muestrales de cada subdivisión; por ejemplo, el número de muestras podrá ser proporcional al tamaño de la subdivisión o podrá basarse en conocimiento previo sobre la infestación de las subdivisiones. *NIMF n. 31 metodologías para muestreo de envíos* (2008)

- Muestreo por conglomerados: El muestreo por conglomerados es una técnica utilizada cuando hay agrupamientos "naturales" en una población estadística. En este método, la población total se divide en estos grupos (o clusters) y se utiliza una técnica de muestreo aleatorio para elegir cuáles de estos incluir. Se pueden utilizar todos los elementos de cada uno de los grupos seleccionados (monoetápico), o se puede extraer una muestra de cada uno de ellos (bietápico).

  Por ejemplo, se necesita extraer $n$ plantas de un lote de tamaño $N$. Estas plantas se encuentran ubicadas por grupos en camas o bases. En este caso, la unidad de muestreo serán las camas, por lo tanto, no todas las camas serán examinadas. Dentro de cada cama seleccionada se muestreará cierta cantidad de plantas, de tal forma que al final se obtenga las $n$ plantas de las camas seleccionadas.

  Una de las principales ventajas es que se ahorra costo y tiempo, dado que no es necesario listar todas las unidades de la población. Solo es necesario un marco o lista de conglomerados que será más fácil y rápido de realizar.

**Muestreo no probabilístico**

- Muestreo en zigzag: Es un método de muestreo seguido por la mayoría de los agricultores, consiste en definir un transecto en zigzag que cubra todo el lote. Se fijan $n$ puntos a lo largo de la ruta en zigzag, y se selecciona la planta más cercana a cada uno de los puntos seleccionados. La figura **2-7** ilustra el procedimiento. Paulo et al. (2005)

- Muestreo de radio fijo: Se basa en centros de parcela aleatorios o desarrollados sistemáticamente. Cada parcela tiene un radio predeterminado (fijo) y se muestrearán todas las plantas dentro de dicho radio. La figura **2-8** ilustra el procedimiento.

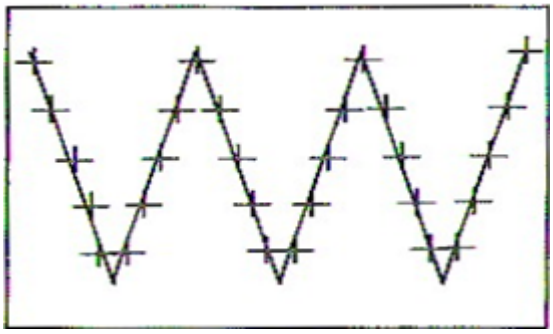


**Figura 2-7**.: Muestreo en Zig-zag.
**Fuente:** Motz et al. (2010).

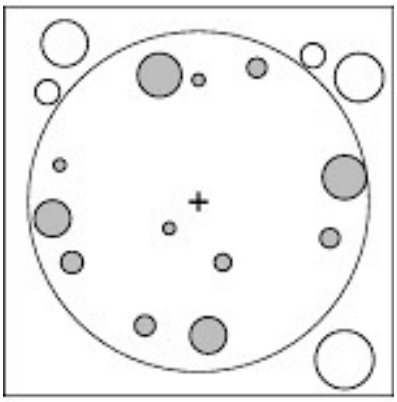


**Figura 2-8**.: Muestreo de radio fijo.
**Recuperado de:** `https://cropnuts.helpscoutdocs.com/article/885-soil-sampling-procedure-for-coffee`

- Muestreo de distancia de k-árboles: Se inicia con una selección aleatoria de $m$ parcelas o ubicaciones en el lote. A continuación, se seleccionan los $k$ árboles más cercanos a las parcelas seleccionadas. Note que $m * k$ debe ser igual a $n$, para completar la muestra requerida. La figura **2-9** ilustra el procedimiento. Paulo et al. (2005)

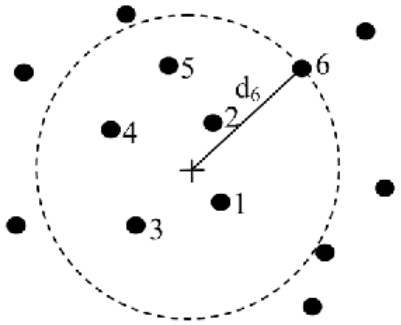



**Figura 2-9**.: Muestreo de distancia de k-árboles ($k = 6$).
**Fuente:** Kleinn & Vilko (2007).

Note que la diferencia entre estos últimos dos métodos es que en el muestreo de radio fijo se seleccionan **todas** las plantas dentro del radio establecido, mientras en el muestreo de distancia de k-árboles se seleccionan solo las $k$ plantas más cercanas al centro. En el primero, la cantidad de plantas a seleccionar por parcela es incierta. En el segundo, se establece a priori cuántas plantas van a ser seleccionadas por parcela.

# 3. Metodología

En esta sección se presenta la metodología planteada para dar solución a la pregunta de investigación y a los objetivos propuestos. En una primera fase se realizaron visitas de campo, con el objetivo de obtener información acerca de la ubicación, orden y proceso de producción de los lotes de plantas de cítricos en los viveros. Posteriormente, se evaluó la existencia de datos históricos sobre la calidad de los lotes de los proveedores. A pesar de que esta era una tarea propuesta para nutrir el conocimiento de la calidad histórica de los lotes, la falta de información no permitió realizarla. Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se diseñó una estrategia de construcción de planes de muestreo y se deasrrolló una herramienta de computo en la cual se obtienen los resultados de los planes de muestreo. Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad y una verificación de riesgo por simulación, y se generaron ciertas recomendaciones sobre la estrategia de selección de la muestra. La figura **3-1** muestra el resumen de las actividades realizadas por fases.

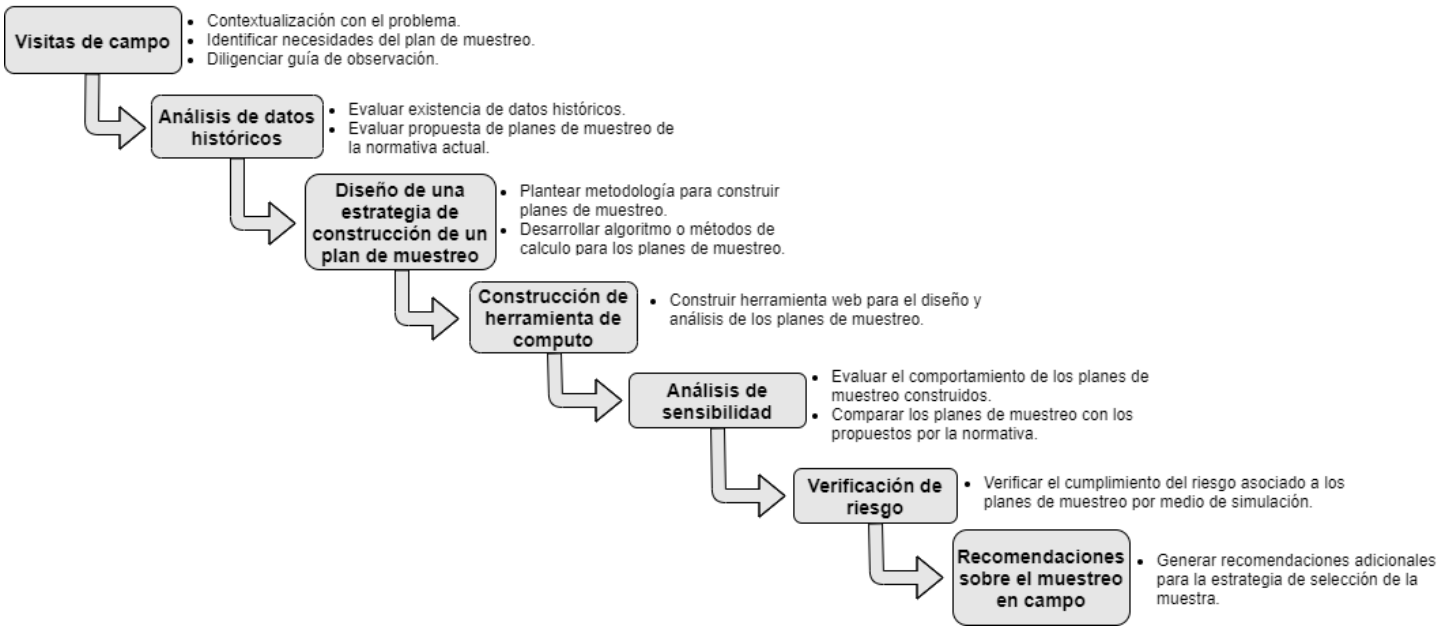



**Figura 3-1**.: Esquema de metodología y actividades por fases.

## 3.1. Visitas de campo

Se visitaron tres viveros ubicados en Caicedonia - Valle del Cauca, Villa Gorgona - Valle del Cauca y Calarcá - Quindío y se utilizó una guía de observación de elaboración propia (ver anexo A), para identificar las necesidades o requerimientos del plan de muestreo. En esta guía de observación se preguntó a los productores sobre aspectos de interés, tales como: si habían realizado muestreos anteriormente y de qué forma se hizo; el riesgo que están dispuestos a asumir con el muestreo; las precauciones que toman para evitar posibles infecciones en las plantas; la forma como dispone y separa las plantas que van a ser entregadas (vendidas); entre otras.

## 3.2. Análisis de datos históricos

Inicialmente, se pensó en realizar un análisis de datos históricos para obtener información acerca de la calidad entregada por los productores y extraer valores propuestos para los parámetros de diseño de los planes de muestreo. Sin embargo, no fue posible desarrollarlo dado que la reglamentación o normativa es nueva y no se dispone de registros de evaluaciones o verificaciones realizadas anteriormente. A pesar de que no se pudo realizar, se incluye en la metodología, por ser este un punto que es recomendable llevar a cabo en un proceso con historia.

En caso de contar con datos históricos de la calidad observada en los lotes, se analiza la variable que defina la calidad, utilizando tablas de frecuencias o tablas con estadísticas de tendencia central y de dispersión como el mínimo, máximo, media, mediana, desviación estándar, 1er y 3er cuartil, y se realizan las representaciones gráficas adecuadas. A partir de dicho análisis, se forman grupos (clusters) de proveedores dependiendo de la calidad que entregan y del tamaño de los lotes, estos grupos se encuentran utilizando alguna técnica de agrupamiento adecuada. Con esto, es posible diferenciar proveedores y establecer diversos escenarios de muestreo, asumiendo riesgos mayores o menores dependiendo de la calidad de estos.

## 3.3. Diseño de una estrategia de construcción de un plan de muestreo

Como ya se mencionó en la sección 2.2, por los métodos de transmisión (manual y mecánico) de las enfermedades, aceptar un lote con algunas plantas infectadas puede poner en riesgo

todo el lote completo y los cultivos citrícolas en general. Esto afecta la producción y genera grandes perdidas económicas. Por ello se requiere que la calidad de los lotes sea muy cercana al 100 % y minimizar las posibilidades de que un lote malo sea aceptado (riesgo del consumidor). Dados estos requerimientos, se diseñan planes de muestreo cero defectos (criterio de aceptación $c = 0$).

Los planes de muestreo se desarrollaron para las categorías de plantas registradas y certificadas (ver sección 4.8), dado que estas categorías corresponden a la parte final del ciclo de producción y usualmente se tienen lotes grandes para satisfacer la demanda. Dada la imposibilidad de inspeccionar todo el lote, se hace necesario aplicar el proceso de verificación en estas categorías. Como se vio en la tabla **2-1**, para las categorías genética y básica se realiza inspección al 100 % y no es necesario establecer planes de muestreo para ellos, ya que corresponden al ciclo inicial del proceso de producción, por lo que se debe garantizar al 100 % que todas estén libres de infecciones.

Teniendo en cuenta que el criterio de aceptación es cero, y que los lotes deben estar libres de enfermedades, se fijan los riesgos del productor ($\alpha$) y el nivel de calidad aceptable ($AQL$) en cero, dado que bajo este plan de muestreo, si un productor tiene su lote totalmente limpio, no existe posibilidad de que su lote sea rechazado, es decir, el riesgo de este es nulo; y se deja como parámetros de entrada el riesgo máximo del consumidor ($\beta_{max}$) y el nivel de calidad rechazable ($RQL$). Una vez definidos estos parámetros, se generará el tamaño de muestra óptimo, utilizando las distribuciones de probabilidad y métodos exactos. El valor óptimo de tamaño de muestra que cumple con los criterios establecidos se obtendrá mediante métodos computacionales que solucionan las ecuaciones planteadas (2-13).

## 3.4. Construcción de herramienta de computo

Una de las dificultades que generalmente limita la implementación del plan de muestreo se relaciona con los complejos cálculos que se requieren. Para facilitar esta labor se construyó una herramienta de computo que a partir de los parámetros de entrada, realiza los cálculos para obtener el tamaño de muestra que cumpla con las condiciones, y además, esta herramienta genera un diagnóstico gráfico de la bondad del plan de muestreo, que incluye la curva característica de operación y la curva $AOQ$. Esta herramienta de computo se construyó utilizando el paquete shiny (Chang et al. 2019) del software (R Core Team 2019), el cual facilita la creación de aplicaciones web interactivas.

## 3.5. Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para los planes de muestreo obtenidos para evaluar el comportamiento de los tamaños de muestra y de los riesgos del consumidor, dependiendo de las variables de entrada ($N$,$RQL$,$\beta_{max}$). Este análisis se complementó con una comparación contra los planes de muestreo propuestos por la normativa, donde se construyeron indicadores de sobre costo y sobre riesgo que permiten tener una evaluación objetiva de las propuestas y sirven como método de selección sobre estas. Los indicadores de desempeño AOQ y ATI finalmente no fueron utilizados, ya que su uso está limitado a muestreo rectificativo. En nuestro caso de estudio, lo lotes con plantas infectadas no son rectificados.

## 3.6. Verificación de riesgo

Para corroborar que los planes de muestreo propuestos cumplen con el riesgo máximo tolerable, se plantearon diversos escenarios de simulación con múltiples combinaciones de parámetros de entrada. Dependiendo del tamaño del lote ($N$) y del nivel de calidad rechazable ($RQL$), se simularon lotes de dicho tamaño y se generaron $N * RQL$ plantas infectadas aleatoriamente dentro de este. De esta manera se debe cumplir que la probabilidad de aceptarlos sea menor o igual al riesgo máximo del consumidor establecido para el plan de muestreo. Esta probabilidad se calculó luego de aplicar muchas veces el plan de muestreo en los lotes correspondientes.

## 3.7. Recomendaciones sobre el muestreo en campo

Para garantizar la selección aleatoria de las plantas y su factibilidad operativa, se generaron ciertas pautas para realizar el muestreo en los lotes teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la visita de campo, es decir, estas recomendaciones para seleccionar la cantidad de plantas ($n$) va a depender de la ubicación y orden de las plantas en los viveros, además de la capacidad logística que tengan los productores. Se analizaron diferentes estrategias de selección de la muestra de manera subjetiva y se recomendó la mejor forma de seleccionar las plantas garantizando los principios básicos de muestreo como la aleatoriedad y la independencia.

# 4. Resultados

## 4.1. Visita de campo

Se visitaron tres viveros ubicados en Caicedonia - Valle del Cauca, Villa Gorgona - Valle del Cauca y Calarcá - Quindío. Estos presentaron una capacidad de producción anual entre 70000 y 120000 plantas. Se debe tener en cuenta que el control de calidad de los lotes se realizará sobre las plantas de la categoría registrada y certificada que están finalizando su instancia en vivero y tienen la edad suficiente para ser evaluadas e identificadas en laboratorio como infectadas o no infectadas, por lo cual el tamaño del lote es inferior a la capacidad del vivero. Adicionalmente, la cifra de capacidad que se indica se refiere a la producción anual y un lote de producción no representa un año de producción. En la figura **4-1** se presenta el registro fotográfico de los lotes de cítricos en viveros.



**Figura 4-1**.: Lotes de citrícos en viveros

En la figura **4-1** se aprecia la organización y distribución de las plantas en vivero. En estos viveros las plantas son ordenadas de forma similar, en camas con dimensiones de 6 columnas por 100 hasta 140 filas, dependiendo del vivero.

De estas visitas se identificaron los siguientes requerimientos, que se deben tener en cuenta en el planteamiento de la metodología para construir los planes de muestreo.

1. No se puede admitir ninguna planta infectada en la muestra obtenida.
2. El nivel de calidad requerido es del 100 %, ya que por la facilidad de transmisión de estas enfermedades, al admitir plantas infectadas en el lote, el riesgo de contagio del resto de plantas es muy alto.
3. Se procura identificar y rechazar la gran mayoría de lotes que sobrepasen el nivel de calidad requerido, evitando así que los consumidores reciban lotes de mala calidad.

## 4.2. Análisis de datos históricos

Generalmente, cuando el proceso de verificación de lotes se realiza de forma periódica, suelen registrarse los resultados de cada verificación, conformando así una historia de la calidad habitual de los lotes. Esta información tiene gran utilidad, puesto que proporcionan una referencia para el diseño del plan de muestreo. En este caso, verificación de lotes de cultivos de cítricos, el procedimiento es nuevo y no se dispone de un registro histórico del mismo.

En este sentido, se hace la recomendación al ente de control, para que en adelante, registre los resultados individuales de cada inspeccción realizada. Es sumamente importante almacenar el historial de cada productor acerca de su nivel de calidad entregado. Variables como tamaño del lote evaluado, cantidad de plantas muestreadas y cantidad de plantas infectadas en la muestra, permitirá flexibilizar o ser más estrictos en los tamaños de muestra, analizando al productor individualmente y "premiando" con un tamaño de muestra inferior y por tanto menos costoso, a aquellos que mantengan sus niveles de calidad por debajo de los requeridos. Por el contrario, para los productores con un historial negativo, se deberán asumir riesgos menores, lo que generará un tamaño de muestra superior y más costoso, obligando a mejorar sus niveles de calidad hasta llegar al nivel deseado.

Como se mencionó anteriormente, una de las desventajas que presenta la norma técnica 12816 (ICA 2019), es que esta no fue creada desde un enfoque estadístico, por lo cual no se conocen los riesgos del consumidor asociados a esta estrategia de muestreo. En este trabajo se realiza la evaluación de este riesgo del consumidor para varias combinaciones de tamaños de lote y de niveles de calidad rechazable (RQL), los resultados se presentan en la tabla **4-1** para las categorías registrada (2 %) y certificada (0.2 %).

**Tabla 4-1**.: Riesgo del consumidor $\beta$ para los planes de muestreo de la norma 12816 para virus de la tristeza.

| | | | **Nivel de calidad rechazable ($RQL$)** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Categoría** | **Tamaño de lote ($N$)** | **Tamaño de muestra ($n$)** | **0.01** | **0.03** | **0.05** | **0.1** |
| **Registrada** | **500** | **10** | 90.36 % | 73.54 % | 59.59 % | 34.52 % |
| | **1000** | **20** | 81.63 % | 54.06 % | 35.49 % | 11.90 % |
| | **5000** | **100** | 36.23 % | 4.61 % | 0.56 % | 0.002 % |
| | **10000** | **200** | 13.13 % | 0.21 % | 0.003 % | $\approx$ 0 % |
| | **15000** | **300** | 4.76 % | 0.01 % | $\approx$ 0 % | $\approx$ 0 % |
| **Certificada** | **5000** | **10** | 90.43 % | 73.72 % | 59.85 % | 34.83 % |
| | **10000** | **20** | 81.78 % | 54.35 % | 35.81 % | 12.13 % |
| | **20000** | **40** | 66.87 % | 29.54 % | 12.82 % | 1.47 % |
| | **50000** | **100** | 36.57 % | 4.74 % | 0.59 % | 0.003 % |
| | **100000** | **200** | 13.37 % | 0.23 % | 0.003 % | $\approx$ 0 % |

En la tabla **4-1** se observa que para ambas categorías los riesgos del consumidor son muy altos para lotes pequeños (500 y 1000 en registrada, y 5000,10000 y 20000 en certificada), incluso para un nivel de calidad rechazable de 0.1. En la mayoría de casos, el poder de discriminación del plan de muestreo es inferior al lanzamiento de una moneda (50 - 50), esto implica que los planes de muestreo a porcentaje fijo sugeridos por la normativa no tienen suficiente capacidad para detectar lotes pequeños infectados. Por el contrario, en el otro extremo, para lotes grandes (10000 y 15000 en registrada, y 50000 y 100000 en certificada) y niveles de calidad rechazable mayores o iguales a 0.03, el riesgo del consumidor es casi 0. Esto sugiere que los tamaños de muestra son excesivos y el riesgo es demasiado bajo, generando sobrecostos innecesarios. Lo anterior corrobora los inconvenientes mencionados y demuestra que los planes de muestreo propuestos son insuficientes para la problemática.

## 4.3. Diseño de una estrategia de construcción de un plan de muestreo

Con los requerimientos del plan de muestreo identificados, recordando que no se toleran plantas infectadas y que no existe un riesgo para el productor; nuestra propuesta de diseño de plan de muestreo requiere definir los parámetros de entrada:

1. $N$ : Tamaño del lote
2. $RQL$ : Nivel de calidad rechazable
3. $\beta_{max}$ : Riesgo máximo tolerable para el consumidor. Corresponde a la probabilidad máxima exigida para que el procedimiento acepte un lote que no cumple con las condiciones de calidad establecidas.

Ante la ausencia de registros históricos, estos valores han sido establecidos por un grupo de expertos (Agrosavia), quienes han contribuido a definir los requerimientos del plan de muestreo. Según su criterio técnico, los requerimientos son de un $RQL = 0.05$ y $\beta_{max} = 0.05$. Sin embargo, para realizar un análisis más robusto se tomarán en cuenta otras combinaciones de parámetros.

Una vez se definen los parámetros de entrada, el plan de muestreo óptimo será aquel que con el menor tamaño de muestra satisfaga el riesgo deseado para el consumidor. Esto es, prefijados ($N$, $RQL$ y $\beta_{max}$) el tamaño de muestra óptimo será el mínimo valor de $n$ que satisface la siguiente ecuación:

$$\frac{(N-D)! \cdot (N-n)!}{(N-D-n)! \cdot N!} \leq \beta_{max} \tag{4-1}$$

Aquí, $D = RQL * N$ es la cantidad de plantas infectadas que no se está dispuesto a tolerar en el lote.

El tamaño de muestra $n$ se busca a través de exploración exhaustiva, incrementando $n$ hasta encontrar el primer tamaño de muestra que cumple la restricción 4-1. El algoritmo 1 ilustra el procedimiento.

**Algoritmo 1** Diseño de planes de muestreo $c = 0$

**Entrada:** $N \in \mathbb{Z}^+$, $0 \leq RQL \leq 1$, $0 \leq \beta_{max} \leq 1$ ▷ Definir los valores de entrada

**procedimiento** DSP0($N, RQL, \beta_{max}$)
  $d_p \leftarrow seq(0 : N)$ ▷ Posible número de plantas infectadas en el lote
  $p \leftarrow d_p/N$ ▷ Posibles % de unidades defectuosas
  $d \leftarrow max(d_p[p <= RQL])$ ▷ Supremo número de plantas infectadas
  **para** $n \leftarrow 1$ **hasta** $N - d$ **hacer**
    $\beta \leftarrow phyper(0, d, N - d, n)$
    **si** $\beta <= \beta_{max}$ **entonces**
      **romper**
    **fin si**
  **fin para**
  **si** $\beta > \beta_{max}$ **entonces**
    $n \leftarrow NA$
    $\beta \leftarrow NA$
  **sino**
    $n \leftarrow n$
    $\beta \leftarrow \beta$
  **fin si**
  **devolver** $(n, \beta)$
**fin procedimiento**

Como se observa en la linea 6, el calculo del riesgo del consumidor $\beta$ es exacto, ya que se basa en la distribución hipergeométrica. Esto permite que se tome en cuenta el tamaño del lote en el cálculo correspondiente y la metodología no solo sea aplicable para lotes grandes (donde se cumple la aproximación a la distribución Binomial). Además, haciendo uso de la exploración exahustiva, el tamaño de muestra obtenido será el óptimo, lo cual no se podría garantizar con las distribuciones y métodos de calculo aproximados.

## 4.4. Herramienta de computo

En esta sección se presenta la herramienta web construida para desarrollar y analizar un plan de muestreo con criterio de aceptación $c = 0$. Esta herramienta, que fue construida en el software R, con lo elementos de programación reactiva proporcionados por la librería Shiny, es de libre acceso y se encuentra disponible en el enlace `https://kevinch.shinyapps.io/MuestreoAceptacion/`. La herramienta tiene como objetivo proporcionar una manera fácil e interactiva de diseñar, evaluar y analizar planes de muestreo para aceptación de lotes con $c = 0$, y ofrecer la posibilidad de comparar los planes obtenidos contra los sugeridos por la normativa (ICA 2019), expuestos en la tabla **2-1**.

La interfaz se divide en dos paneles (figura **4-2**) , un panel de valores de entrada y botones de acción que se encarga de recibir la información y aplicar la exploración exahustiva, generando el tamaño de muestra óptimo y reportando el riesgo asociado; y un panel gráfico que contiene las curvas CO y la curva AOQ, útiles para evaluar el desempeño global del plan de muestreo.




**Figura 4-2**.: Aplicación web: Interfaz gráfica




**Figura 4-3**.: Aplicación web: Modulo de Diseño de un plan de muestreo




**Figura 4-4**.: Aplicación web: Modulo de Evaluación de un plan de muestreo

La aplicación cuenta con dos pestañas, "Diseño" y "Evaluación". En la pestaña de diseño (figura **4-3**) se ingresan los parámetros de entrada o requerimientos del muestreo y se calcula el valor óptimo de $n$ y el riesgo asociado, además, se ofrece la posibilidad de realizar la comparación gráfica del plan obtenido con los valores de la norma 12816 para las plantas de la categoría "registrada" y "certificada". En la pestaña de evaluación (figura **4-4**), se calcula el riesgo del consumidor para un plan de muestreo definido por el usuario (no necesariamente el plan óptimo), con cualquier criterio de aceptación $c = 0, 1, 2, ...$, además de los planes particulares de la norma, para facilitar la comparación entre planes de muestreo.

### 4.4.1. Ilustración de la metodología y del uso de la herramienta web

En esta sección se presentan dos casos de estudio para ilustrar la metodología propuesta y el uso de la herramienta web construida. El objetivo es explicar el funcionamiento de cada

uno de los campos de la herramienta, identificando las entradas requeridas e interpretando las salidas o resultados obtenidos.

**Caso de estudio 1:** Se desea evaluar un lote de cítricos de la categoría registrada; este lote cuenta con $N = 2000$ plantas. Definimos un $RQL = 0.01$, y se está dispuesto a asumir un riesgo máximo para el consumidor de $\beta_{max} = 0.05$. La figura **4-5** muestra los resultados obtenidos mediante la herramienta de computo. Dadas las entradas correspondientes, se obtiene un tamaño de muestra de 277 plantas cuyo riesgo asociado es de 4.99 %, el cual cumple con el riesgo máximo tolerable que es de 5 %. Teniendo en cuenta que se tiene seleccionado la opción "Registrada" en la parte inferior de la pestaña, la salida gráfica muestra dos curvas que corresponden al plan de muestreo de la norma (curva azul) y al plan de muestreo propuesto (curva negra). El tamaño de muestra según la normativa es de 40 (0.02∗2000) plantas, el cual tiene un riesgo asociado para el consumidor de 66.6 %, es decir, de 100 lotes infectados evaluados bajo este plan de muestreo, aproximadamente 67 de ellos serán aceptados, por tanto, el poder de discriminación bajo este tamaño de muestra es inferior al del lanzamiento de una moneda.

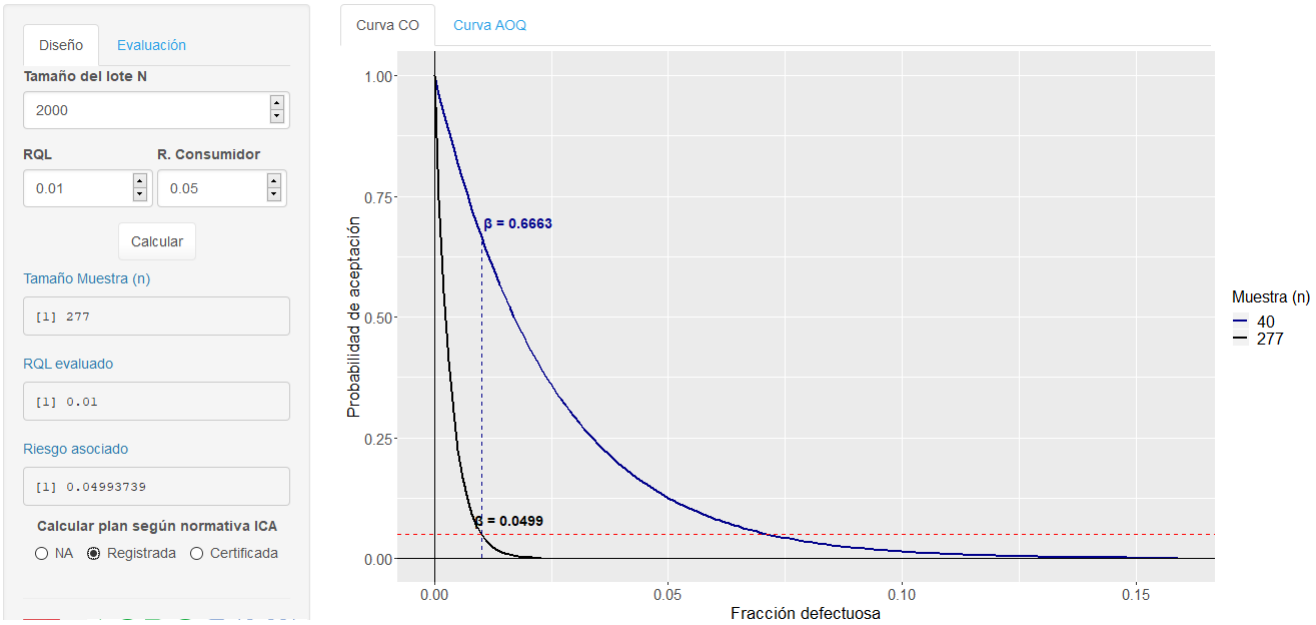



**Figura 4-5**.: Ilustración del uso de la aplicación web, Ejemplo 1.

**Caso de estudio 2:** Se desea evaluar un lote de cítricos de la categoría certificada; este lote cuenta con $N = 8000$ plantas. Definimos un $RQL = 0.01$, y se está dispuesto a asumir un riesgo máximo para el consumidor de $\beta_{max} = 0.1$. La figura **4-6** muestra los resultados obtenidos mediante la herramienta de computo. Dados los valores de entrada $N = 8000$, $RQL = 0.01$ y $\beta_{max} = 0.1$, se obtiene un tamaño de muestra de 226 plantas cuyo riesgo asociado es de 9.98 %, el cual también cumple con el riesgo máximo tolerable que es de

10 %. Teniendo en cuenta que se tiene seleccionado la opción "Certificada", se muestran las dos curvas en la salida gráfica. El tamaño de muestra según la normativa es de solo 16 (0.002∗8000) plantas, el cual tiene un riesgo asociado para el consumidor de 85.1 %.

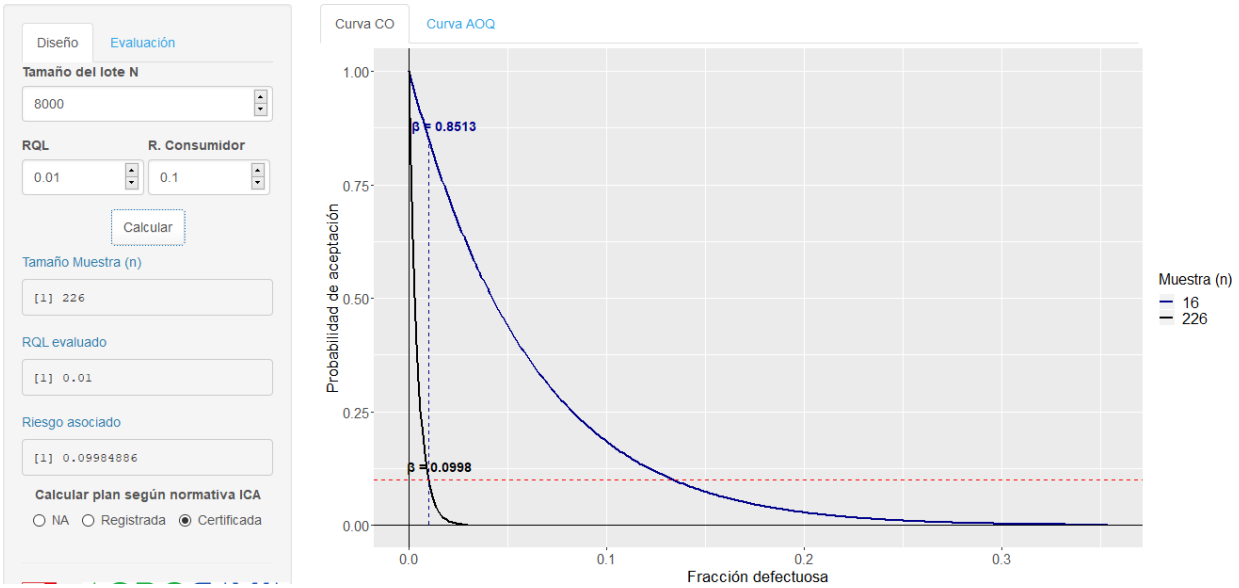



**Figura 4-6**.: Ilustración del uso de la aplicación web, Ejemplo 2.

Estos casos de estudio muestran las bondades de la herramienta de computo construida, la cual no solo permite calcular los tamaños de muestra óptimos para los requerimientos dados, si no que también permite evaluar la normativa actual y cualquier otro plan que se desee (en la pestaña evaluación).

## 4.5. Análisis de sensibilidad

En esta sección se presenta una comparación más amplia entre los planes de muestreo obtenidos a partir de la metodología propuesta y los establecidos por la norma 12816 en la tabla **2-1** para virus de la tristeza (CTV) y las categorías de plantas "Registrada" y "Certificada". La comparación se realizó comparando los tamaños de muestra y el riesgo asociado al consumidor.

Para hacer la comparación, se definen dos indicadores, sobre costo y sobre riesgo, que corresponden a las fracciones:

$$ISC = \frac{n_{propuesta}}{n_{norma}} \tag{4-2}$$

$$ISR = \frac{\beta_{norma}}{\beta_{propuesta}} \tag{4-3}$$

Estos valores permiten comparar el costo y el riesgo del consumidor asociados a ambos planes de muestreo. El indicador de sobre costo ($ISC$) se interpreta como la cantidad de veces a la que equivale el tamaño de muestra propuesto con respecto al tamaño de muestra de la norma. Por ejemplo, un $ISC = 10$, significa que el tamaño de muestra propuesto es 10 veces el tamaño de muestra de la normativa por lo tanto el costo del muestreo, proporcional al tamaño de la muestra, es también 10 veces mayor. Por otro lado, el indicador de sobre riesgo $ISR$ se interpreta como la cantidad de veces a la que equivale el riesgo del consumidor correspondiente a la norma con respecto al riesgo asociado a la propuesta. Por ejemplo, un $ISR = 10$, significa que el riesgo asociado a la norma es 10 veces el riesgo del plan de muestreo de la propuesta. En la tabla **4-2** se ilustran los resultados.

**Tabla 4-2**.: Indicadores de sobre costo y sobre riesgo para los planes de muestreo

| | | | **Tamaño de lote ($N$)** | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **100** | | **200** | | **500** | | **1000** | | **2000** | | **5000** | | **10000** | |
| **Categoría** | $RQL$ | $\beta_{max}$ | $n_1/n_2$ | $\beta_2/\beta_1$ | $n_1/n_2$ | $\beta_2/\beta_1$ | $n_1/n_2$ | $\beta_2/\beta_1$ | $n_1/n_2$ | $\beta_2/\beta_1$ | $n_1/n_2$ | $\beta_2/\beta_1$ | $n_1/n_2$ | $\beta_2/\beta_1$ | $n_1/n_2$ | $\beta_2/\beta_1$ |
| **Registrada** | **0.01** | **0.05** | 48.00 | 24.50 | 38.75 | 19.32 | 22.50 | 18.25 | 12.90 | 16.39 | 6.93 | 13.35 | 2.90 | 7.29 | 1.47 | 2.64 |
| | | **0.1** | 45.50 | 10.89 | 34.25 | 9.79 | 18.40 | 9.06 | 10.25 | 8.19 | 5.43 | 6.70 | 2.24 | 3.63 | 1.14 | 1.32 |
| | | **0.2** | 40.00 | 4.90 | 27.75 | 4.88 | 13.80 | 4.58 | 7.40 | 4.08 | 3.85 | 3.33 | 1.58 | 1.82 | **0.80** | **0.66** |
| | **0.02** | **0.05** | 39.00 | 20.56 | 26.25 | 18.74 | 12.90 | 16.64 | 6.90 | 13.38 | 3.58 | 8.86 | 1.47 | 2.65 | **0.74** | **0.34** |
| | | **0.1** | 34.50 | 10.23 | 21.75 | 9.26 | 10.20 | 8.17 | 5.40 | 6.70 | 2.78 | 4.44 | 1.13 | 1.31 | **0.57** | **0.17** |
| | | **0.2** | 27.50 | 4.80 | 16.50 | 4.64 | 7.40 | 4.11 | 3.85 | 3.36 | 1.98 | 2.25 | **0.80** | **0.66** | **0.40** | **0.09** |
| | **0.03** | **0.05** | 31.50 | 19.56 | 19.50 | 18.05 | 9.00 | 15.13 | 4.70 | 10.94 | 2.40 | 5.85 | **0.98** | **0.94** | **0.49** | **0.04** |
| | | **0.1** | 27.00 | 10.02 | 15.75 | 8.87 | 7.10 | 7.58 | 3.65 | 5.44 | 1.88 | 3.00 | **0.76** | **0.48** | **0.38** | **0.02** |
| | | **0.2** | 21.00 | 4.93 | 11.75 | 4.52 | 5.10 | 3.78 | 2.60 | 2.75 | 1.33 | 1.50 | **0.53** | **0.23** | **0.27** | **0.01** |
| | **0.05** | **0.05** | 22.50 | 19.52 | 12.75 | 16.73 | 5.60 | 12.55 | 2.85 | 7.21 | 1.45 | 2.58 | **0.59** | **0.12** | **0.30** | **0.00** |
| | | **0.1** | 18.50 | 9.66 | 10.25 | 8.56 | 4.30 | 5.98 | 2.20 | 3.57 | 1.13 | 1.30 | **0.45** | **0.06** | **0.23** | **0.00** |
| | | **0.2** | 13.50 | 4.52 | 7.50 | 4.30 | 3.10 | 3.07 | 1.55 | 1.78 | **0.80** | **0.66** | **0.32** | **0.03** | **0.16** | **0.00** |
| **Certificada** | **0.01** | **0.05** | 96.00 | 24.75 | 155.00 | 19.92 | 225.00 | 20.00 | 129.00 | 19.68 | 69.25 | 19.25 | 29.00 | 18.20 | 14.70 | 16.42 |
| | | **0.1** | 91.00 | 11.00 | 137.00 | 10.09 | 184.00 | 9.93 | 102.50 | 9.83 | 54.25 | 9.66 | 22.40 | 9.05 | 11.35 | 8.22 |
| | | **0.2** | 80.00 | 4.95 | 111.00 | 5.03 | 138.00 | 5.02 | 74.00 | 4.90 | 38.50 | 4.81 | 15.80 | 4.54 | 7.95 | 4.09 |
| | **0.02** | **0.05** | 78.00 | 20.99 | 105.00 | 19.92 | 129.00 | 20.00 | 69.00 | 19.32 | 35.75 | 18.48 | 14.70 | 16.64 | 7.40 | 13.56 |
| | | **0.1** | 69.00 | 10.44 | 87.00 | 9.85 | 102.00 | 9.82 | 54.00 | 9.67 | 27.75 | 9.27 | 11.30 | 8.23 | 5.70 | 6.77 |
| | | **0.2** | 55.00 | 4.90 | 66.00 | 4.94 | 74.00 | 4.94 | 38.50 | 4.85 | 19.75 | 4.70 | 8.00 | 4.17 | 4.00 | 3.38 |
| | **0.03** | **0.05** | 63.00 | 20.17 | 78.00 | 19.80 | 90.00 | 19.96 | 47.00 | 19.05 | 24.00 | 17.74 | 9.80 | 15.01 | 4.90 | 10.91 |
| | | **0.1** | 54.00 | 10.33 | 63.00 | 9.73 | 71.00 | 10.00 | 36.50 | 9.47 | 18.75 | 9.09 | 7.60 | 7.60 | 3.80 | 5.55 |
| | | **0.2** | 42.00 | 5.08 | 47.00 | 4.95 | 51.00 | 4.99 | 26.00 | 4.79 | 13.25 | 4.54 | 5.30 | 3.74 | 2.65 | 2.74 |
| | **0.05** | **0.05** | 45.00 | 20.56 | 51.00 | 19.55 | 56.00 | 20.00 | 28.50 | 18.34 | 14.50 | 16.69 | 5.90 | 12.57 | 2.95 | 7.44 |
| | | **0.1** | 37.00 | 10.17 | 41.00 | 10.00 | 43.00 | 9.54 | 22.00 | 9.08 | 11.25 | 8.41 | 4.50 | 6.08 | 2.25 | 3.62 |
| | | **0.2** | 27.00 | 4.76 | 30.00 | 5.03 | 31.00 | 4.90 | 15.50 | 4.54 | 8.00 | 4.26 | 3.20 | 3.11 | 1.60 | 1.85 |

Los valores en color rojo corresponden a los casos donde el plan de muestreo propuesto genera subcosto y sobre riesgo. Por el contrario, los valores en color negro corresponden a los casos donde el plan de muestreo propuesto genera sobre costo y subriesgo. En términos generales, se evidencia que en ambas categorías, y cualquier combinación de $RQL$ y $\beta_{max}$, cuando el lote es de tamaño pequeño, la metodología propuesta genera tamaños de muestra mayores y por ende un sobre costo considerable. Cabe mencionar que en esos casos el riesgo de la normativa es excesivamente alto. Por el contrario, en lotes grandes ($N = 5000; 10000$) se invierte el comportamiento, el plan de muestreo a porcentaje fijo propuesto por la normativa genera un sobre costo excesivo pero genera riesgos mucho más bajos que los de la metodología

propuesta. En esto casos, el riesgo que se genera bajo la norma es demasiado bajo comparado con el riesgo tolerable por el consumidor.

Para ejemplificar esto de manera sencilla se seleccionó un par de valores $(RQL, \beta_{max})$ particulares de cada una de las categorías.

**Categoría registrada**

Para la categoría registrada se tomaron los valores $RQL = 0{,}01$ y $\beta_{max} = 0{,}1$ como parámetros de entrada. La figura **4-7** muestra los resultados obtenidos.

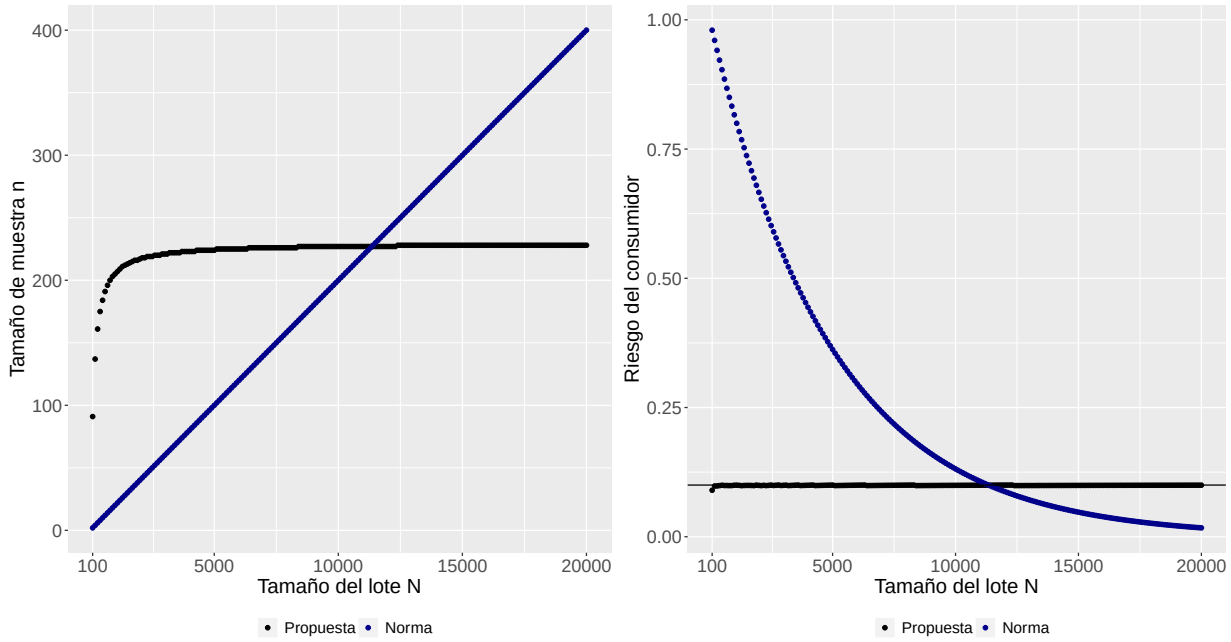



**Figura 4-7**.: Comparación metodología vs normativa actual - Categoría Registrada.

En la gráfica izquierda, se observan los tamaños de muestra obtenidos. Aquí, los puntos azules representan los de la norma a una proporción fija del 2 %. Bajo los parámetros asumidos ($RQL = 0.01$,$\beta_{max} = 0.1$), los tamaños de muestra de la propuesta son superiores a los de la norma para lotes menores a 11400 plantas. Para lotes mayores a dicha cantidad, los tamaños de muestra de la normativa son mucho más altos y siguen creciendo indefinidamente, mientras que los de la propuesta convergen a $n_{max} = 228$ cuando el tamaño del lote tiende a infinito.

Por otro lado, en la gráfica derecha, se representa el riesgo del consumidor $(\beta)$ bajo los tamaños de muestra obtenidos, asumiendo que se tiene un nivel de calidad real igual al nivel de calidad rechazable $RQL = 0.01$, es decir, se representa la probabilidad de aceptar lotes

que no cumplen con el nivel de calidad especificado. Se aprecia que para los tamaños de muestra propios, todos cumplen con la restricción $\beta \leq \beta_{max} = 0.1$ (línea de referencia), es decir, se asegura un porcentaje de detección del 90 % de los lotes que igualen o sobrepasen el nivel de calidad rechazable. Por otro lado, con la normativa actual, para lotes pequeños se está cometiendo un error muy alto, dado que se aceptan lotes de mala calidad un gran porcentaje de veces, mientras que para lotes grandes, tienen un riesgo un poco menor, al costo de muestrear una cantidad demasiado alta. Por esta razón, en la tabla **4-2** se observó que en lotes grandes se invierte la relación, es decir, la normativa tiene un sobre costo y los planes propuestos tienen un sobre riesgo, sin embargo, se aprecia que la ganancia en riesgo es poca, y probablemente no amerita el sobre costo en los tamaños de muestra.

**Categoría certificada**

Para la categoría certificada se tomaron los valores $RQL = 0.01$ y $\beta_{max} = 0.2$ como parámetros de entrada. La figura **4-8** muestra los resultados obtenidos.

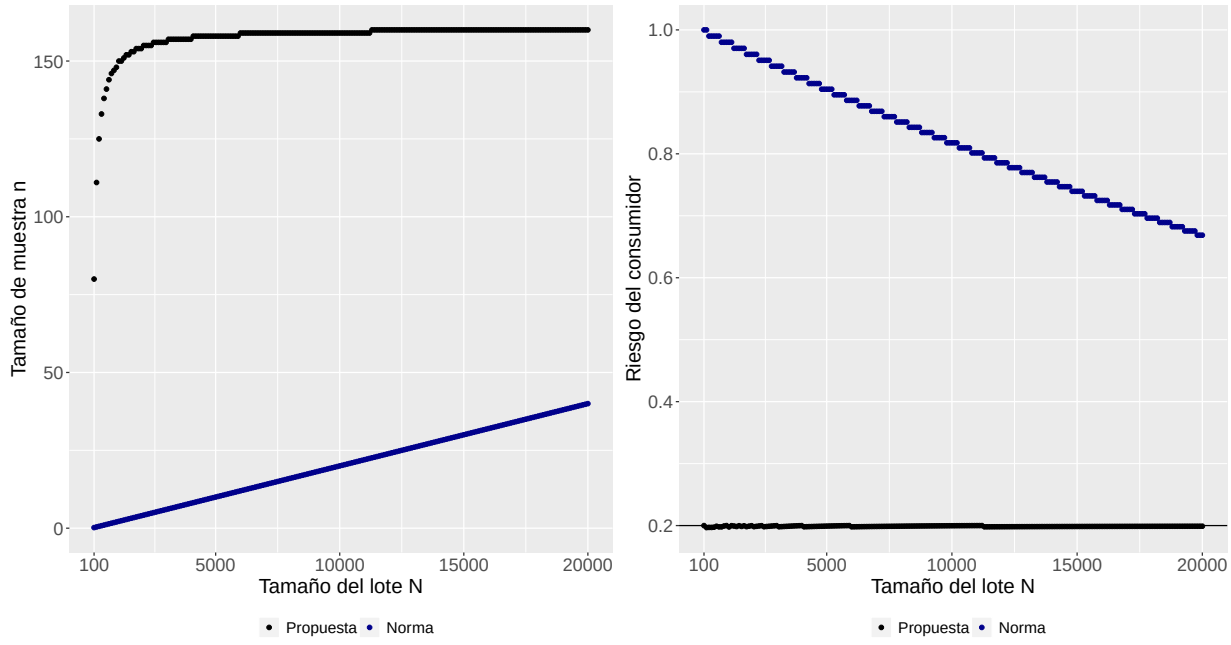



**Figura 4-8**.: Comparación metodología vs normativa actual - Categoría Certificada.

En la categoría "Certificada", la norma establece un porcentaje fijo de muestreo del 0.2 %. Se aprecia que las diferencias son aún mayores. Los tamaños de muestra de la propuesta son más altos hasta para lotes de más de 20.000 plantas, sin embargo, en la gráfica de la derecha se observa que los tamaños de muestra obtenidos aseguran el riesgo asumido, mientras que con el porcentaje de muestreo fijo siempre se incurre en riesgos mucho más altos, cometiendo errores de clasificación una gran cantidad de veces.

## 4.6. Verificación de riesgo

Con el objetivo de corroborar los riesgos asociados a los planes de muestreo propuestos, se simularon lotes de 500, 1000, 5000 y 10000 plantas, con una proporción real de plantas infectadas de 0.01 distribuidas aleatoriamente. Se obtuvo el plan de muestreo correspondiente a cada lote, con un nivel de calidad rechazable $RQL = 0.01$ y se varío el parámetro $\beta_{max}$ entre 0.05, 0.1 y 0.2. Cada plan de muestreo se aplicó 100000 veces, utilizando un muestreo aleatorio simple.

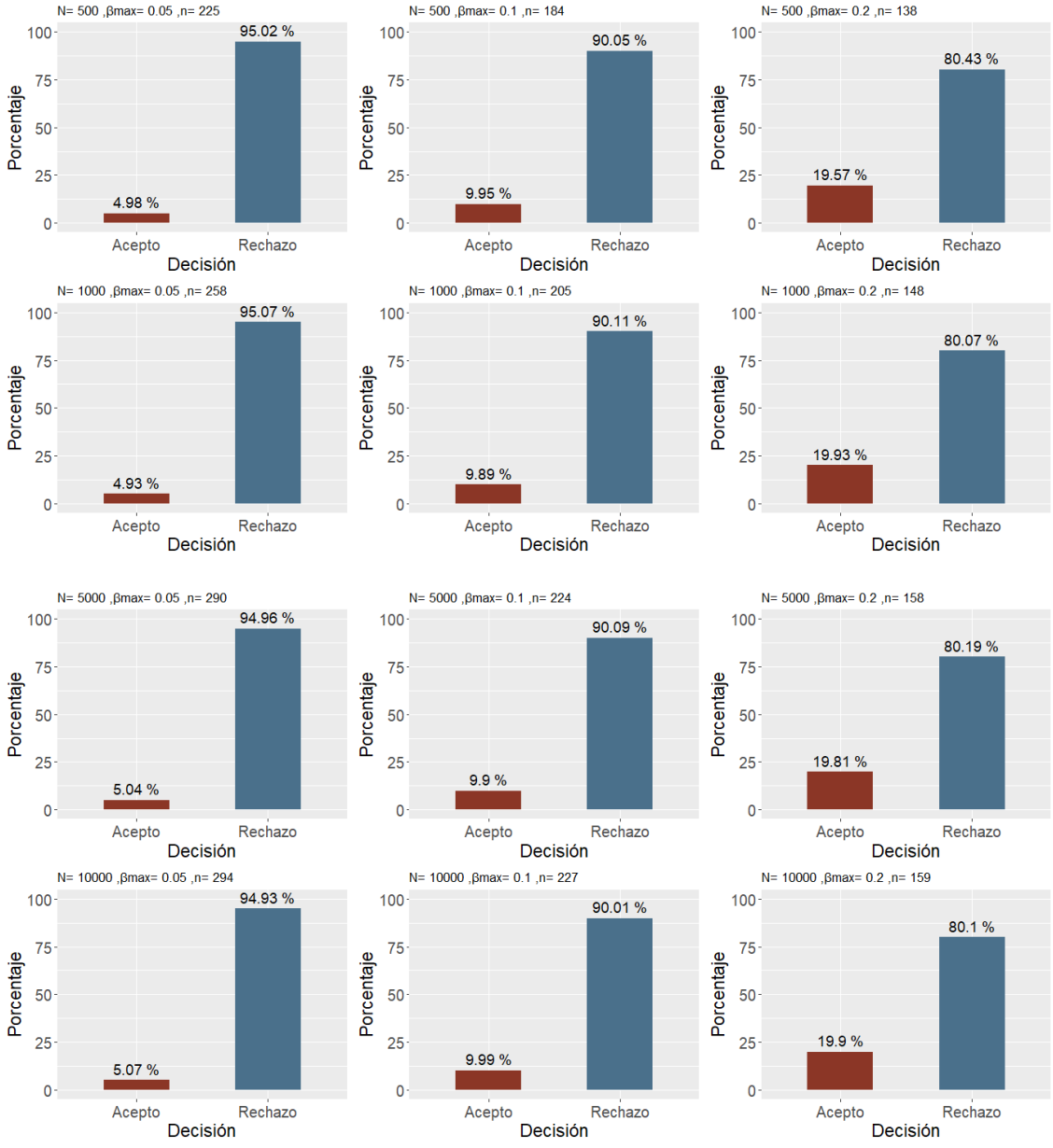



**Figura 4-9**.: Simulación: Porcentajes de aceptación y rechazo de lotes de mala calidad.

La figura **4-9** muestra los porcentajes de aceptación y de rechazo de lotes de mala calidad (riesgo del consumidor) para cada combinación de parámetros. Se aprecia que al aplicar 100000 veces los planes de muestreo obtenidos mediante la metodología, para $\beta_{max} = 0.05$ los porcentajes de aceptación fueron de 4.98, 4.93, 5.04 y 5.07 %; para $\beta_{max} = 0.1$ fueron de 9.95, 9.89, 9.9 y 9.99 %; y para $\beta_{max} = 0.2$ de 19.57, 19.93, 19.81 y 19.9 %. Estos resultados demuestran que los tamaños de muestra propuestos permiten tener los riesgos controlados y son lo suficientemente confiables para los requerimientos o necesidades que se establezcan.

## 4.7. Tabulación de los planes de muestreo

En esta sección se presenta la tabulación de los planes de muestreo, la cual se realiza para ofrecer una alternativa ante la posible aplicación de los planes de muestreo en ubicaciones remotas sin acceso a equipos de computo o conectividad a la herramienta web. Resulta útil para la implementación rápida en campo.

La figura **4-10** corresponde a los tamaños de muestra generados para diversos tamaños de lote ($N$) en un caso particular. Se observa que los tamaños de muestra propuestos son asintóticos y algunos son muy similares, lo cual permite agrupar los planes de muestreo de acuerdo al tamaño del lote. Otros ejemplos particulares donde se evidencia este comportamiento se vieron en las figuras **4-7** y **4-8**.

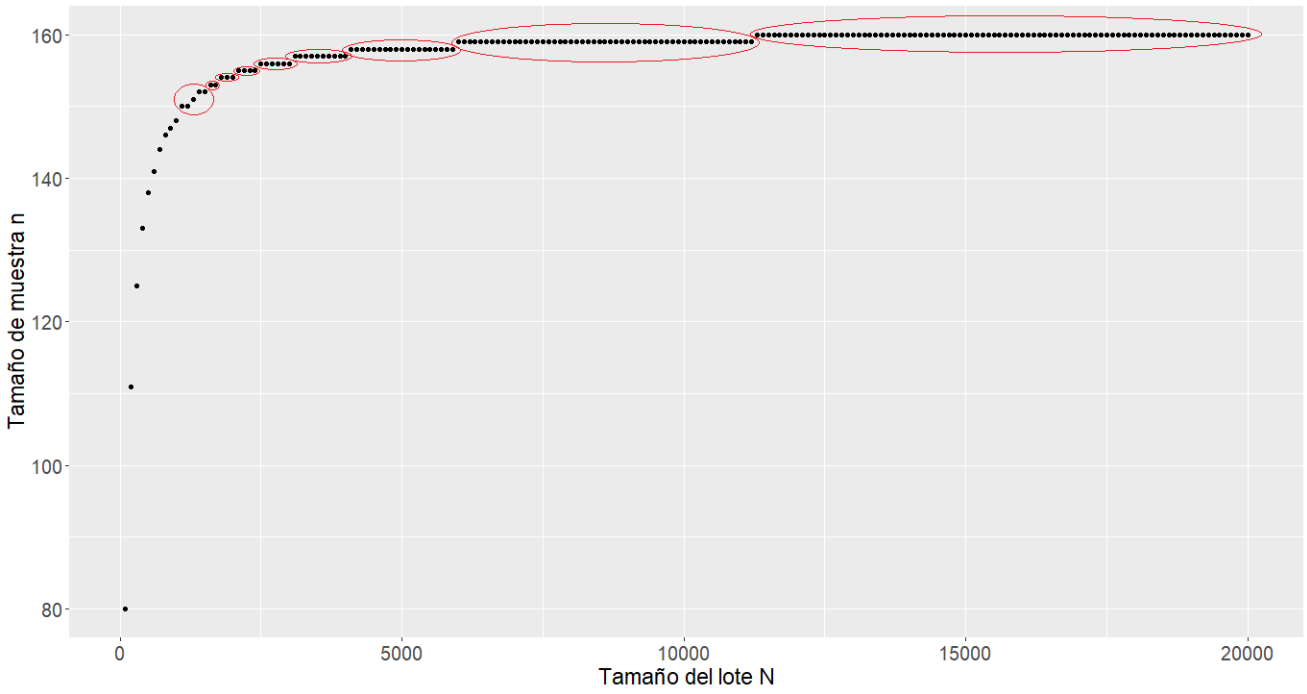



**Figura 4-10**.: Relación entre el tamaño de lote y el tamaño de muestra óptimo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se generó una guía de consulta rápida como alternativa ante la ausencia de herramientas computacionales, conexión a internet o el tiempo requerido para calcular los tamaños de muestra óptimos.

Se construyeron clusters o grupos de tamaños de muestra con un coeficiente de variación $CV \leq 0.02$ y se agruparon los tamaños de lote correspondientes. El coeficiente de variación seleccionado permite que los tamaños de muestra agrupados no varíen en más de un 2 %, lo cual asegura que los grupos conformados sean muy homogéneos. Este coeficiente de variación fue seleccionado teniendo en cuenta los costos asociados a cada muestra (análisis de laboratorio), dado que no se puede permitir agrupar tamaños de muestra que varíen considerablemente.

El procedimiento consiste en obtener los tamaños de muestra para varios tamaños de lote (ver figura **4-10**). En orden ascendente se debe ir adicionando cada tamaño de muestra en el calculo del coeficiente de variación; cuando este sea mayor o igual a 0.02, se debe extraer el último tamaño de muestra adicionado en el calculo, y los restantes conforman un grupo o cluster. De esta manera se sigue el mismo procedimiento hasta finalizar con todos los tamaños de muestra.

La tabla **4-3** muestra los resultados obtenidos para $RQL = 0.05$[1] y $\beta_{max} = 0.01$, 0.05, 0.1 y 0.2. Se seleccionó el tamaño de muestra máximo de todo el cluster como representación de todo el intervalo de tamaños de lote, ya que este asegura que se satisface el riesgo tolerable. En caso de que el tamaño del lote a evaluar sea inferior al tamaño de muestra obtenido, se debe realizar inspección total.

**Tabla 4-3**.: Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$) para $RQL = 0.05$.

| **Riesgo máximo tolerable ($\beta_{max}$)** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0.01** | | **0.05** | | **0.1** | | **0.2** | |
| **T. lote** ($N$) | **T. muestra** ($n$) | **T. lote** ($N$) | **T. muestra** ($n$) | **T. lote** ($N$) | **T. muestra** ($n$) | **T. lote** ($N$) | **T. muestra** ($n$) |
| 1 a 40 | 36 | 1 a 40 | 31 | 1 a 20 | 18 | 1 a 20 | 16 |
| 41 a 60 | 47 | 41 a 60 | 38 | 21 a 40 | 28 | 21 a 40 | 22 |
| 61 a 80 | 54 | 61 a 80 | 42 | 41 a 60 | 32 | 41 a 60 | 25 |
| 81 a 100 | 59 | 81 a 100 | 45 | 61 a 80 | 35 | 61 a 80 | 26 |
| 101 a 120 | 63 | 101 a 140 | 48 | 81 a 120 | 38 | 81 a 100 | 27 |
| 121 a 140 | 67 | 141 a 180 | 50 | 121 a 180 | 40 | 101 a 120 | 28 |
| 141 a 160 | 69 | 181 a 320 | 54 | 181 a 520 | 43 | 121 a 380 | 31 |
| 161 a 200 | 73 | Más de 320 | 59 | Más de 520 | 45 | Más de 380 | 32 |
| 201 a 280 | 77 | | | | | | |
| 281 a 520 | 83 | | | | | | |
| Más de 520 | 90 | | | | | | |

El uso de estas tablas consiste en ubicar los parámetros requeridos ($RQL$ y $\beta_{max}$) y buscar el tamaño del lote ($N$) que va a verificar; en la columna correspondiente a los tamaños de

[1]Para $RQL = 0.02$ y 0.1 ver anexo B

muestra ($n$) se encuentra el plan de muestreo a aplicar. Con esta generalización se pierde exactitud y se puede incurrir en sobrecostos innecesarios. Teniendo en cuenta esto, siempre que sea posible se debe utilizar la aplicación para obtener los resultados óptimos para el tamaño de lote y los requerimientos especificados.

## 4.8. Recomendaciones para el muestreo en campo

El muestreo aleatorio simple de una población puede ser ineficiente operativamente, ya que como se mencionó, su principal limitación es la necesidad de disponer de una lista o marco de referencia de todas las plantas. Esta referencia generalmente no está disponible en poblaciones grandes y en procesos de producción continuos. En estos casos, es preferible utilizar otras técnicas de muestreo. Teniendo en cuenta la distribución espacial de las plantas (figura **4-1**), y con el objetivo de optimizar recursos logísticos, recomendamos utilizar un muestreo de conglomerados bietápico (sección 2.2) para recolectar las plantas de la muestra. Dado que las plantas se organizan en camas, el tamaño de muestra se dividirá en partes iguales entre el número de camas disponibles. Posteriormente, el número de plantas requeridas para cada cama, será seleccionado de forma sistemática, de acuerdo con la ubicación de las plantas en las filas(hileras) de las camas. Un esquema general del proceso se muestra en la figura **4-11**.

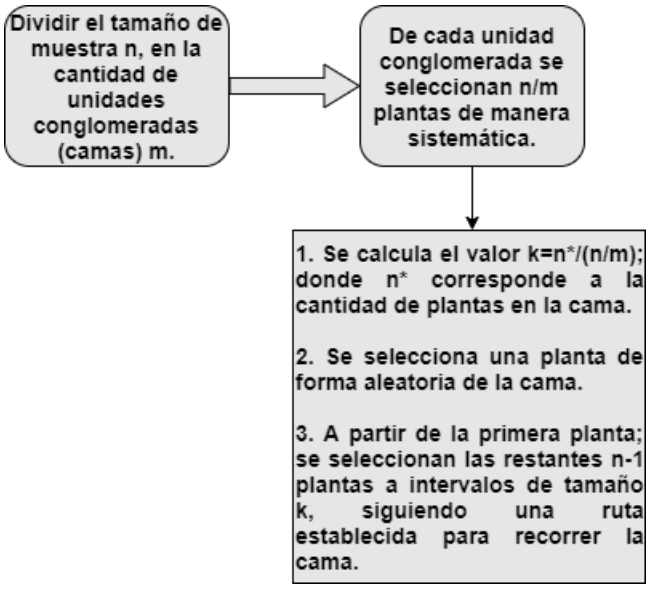



**Figura 4-11**.: Procedimiento de selección de plantas - Esquema General

**Ejemplo:**
Se verificará un lote de 360 plantas bajo los parámetros $RQL = 0.05$ y $\beta_{max} = 0.1$. Este lote está dividido en 4 camas; donde cada una de ellas cuenta con 6 columnas y 15 filas, para un

total de 90 plantas por cama. Mediante la aplicación web construida, se calculó el tamaño de muestra óptimo $n = 43$ (concuerda con los planes de la tabla **4-3**). Siguiendo los pasos del esquema general (figura **4-11**):

1. Se divide el tamaño de muestra por el número de camas. $\frac{43}{4} = 10.75$. Dado que el resultado no fue un número entero, se seleccionarán 11 plantas de tres de las camas, y 10 de la cama restante, para completar el tamaño de muestra $n = 43$.

2. Se calcula el valor k. $k = \frac{90}{11} \approx 8$ para las tres primeras camas y $k = \frac{90}{10} = 9$ para la última cama.

3. Se selecciona una planta al azar de cada cama y se extraen las plantas restantes a intervalos de $k$ plantas. La figura **4-12** ilustra este procedimiento.

   En la primera cama la planta seleccionada al azar correspondió a la de la fila 4 y columna 1 (color verde), a partir de ella, se seleccionaron las restantes 10, recorriendo la cama por columnas (como lo indican las flechas) y en saltos de 8 plantas. El procedimiento fue exactamente el mismo en las camas 2 y 3. Finalmente, en la cama 4, la planta inicial seleccionada aleatoriamente correspondió a la de la fila 14 y columna 1 (color verde), siguiendo el mismo proceso, en saltos de 9 plantas se seleccionaron la restantes 9.

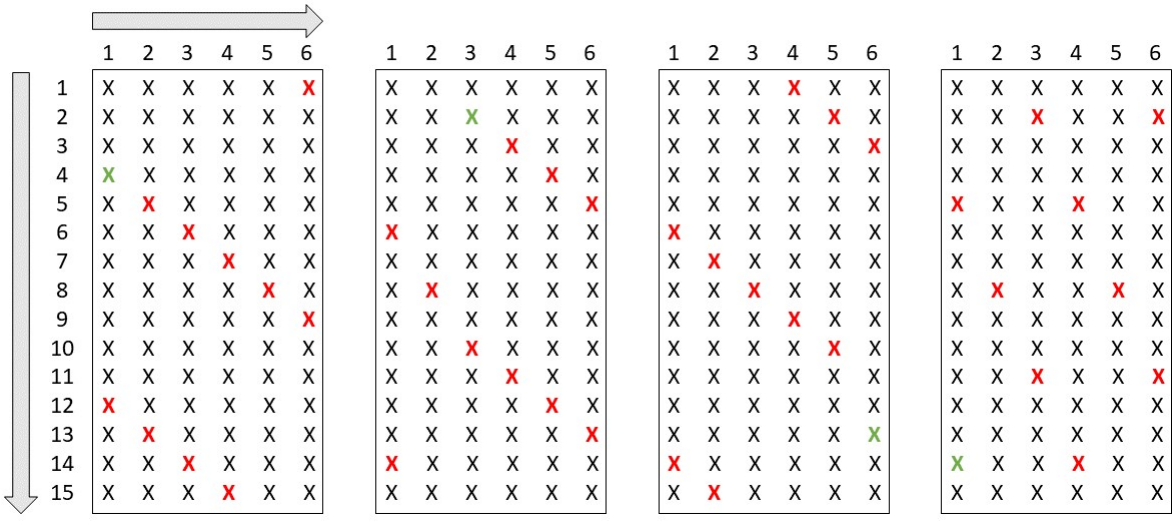


**Figura 4-12**.: Procedimiento de selección de plantas - Ilustración

Este tipo de muestreo garantiza la aleatoriedad y la independencia, los cuales son propiedades estadísticas claves para aplicar la metodología propuesta para la obtención de los tamaños de muestra. Adicionalmente, la selección sistemática de la muestra dentro de las camas, favorece la operatividad y velocidad de la conformación de la muestra.

Adicional a estas recomendaciones, se deben agregar otras que tengan en consideración los expertos; por ejemplo, cómo realizar la toma de la muestra en la planta; en qué tipo de recipientes y cómo debe ser el traslado a laboratorio para evitar coinfección, entre otras.

# 5. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1. Conclusiones

El muestreo para aceptación con criterio $c = 0$, basado en el riesgo del consumidor y en el nivel de calidad rechazable, fue apropiado para la solución del problema de investigación, generando resultados satisfactorios, cumpliendo con los requerimientos establecidos.

En este trabajo no fue considerado el uso de las tablas estándar, por ejemplo Military Standard o Squeglia, debido a que las tablas estándar usualmente tienen valores de riesgos y niveles de calidad preestablecidos. En un caso particular, la propuesta por Squeglia (figura **2-6**) tiene un riesgo predeterminado del 10 %, esto es una problemática en casos de aplicación donde no estén dispuestos a asumir dicho riesgo y requieran otros valores específicos. Por ejemplo, en este caso el riesgo máximo tolerable dado por los expertos fue del 5 %, esto impide el uso de tablas preestablecidas y promueve la utilización de la aplicación web, que permite encontrar los planes de muestreo para cualquier conjunto de parámetros de entrada.

El uso de la distribución hipergeométrica y del algoritmo de exploración exahustiva permitió obtener resultados exactos y fue eficiente computacionalmente.

La aplicación construida es un gran aporte, ya que facilita los complejos cálculos que se requieren y se tiene la certeza que los resultados obtenidos son exactos y no se basan en aproximaciones como es el caso del nomograma de la figura **2-4**. Esta aplicación es de fácil acceso y manipulación, y facilita la interacción entre los usuarios y la solución planteada. Finalmente, esta herramienta computacional es robusta, ya que además de diseñar los planes de muestreo para requerimientos de entrada, permite evaluar planes de muestreo particulares dados por el usuario y realizar comparaciones con la normativa actual; estas comparaciones son amigables, ya que se realizan de forma gráfica por medio de las curvas $CO$ y $AOQ$, permitiendo así que cualquier tipo de usuario pueda interpretarlas y elegir el plan que resulte apropiado para su problema.

Los planes de muestreo de proporción fija propuestos por la normativa, mostraron tener inconvenientes graves. Para tamaños de lote relativamente pequeños, los porcentajes de muestreo del 2 % y del 0.2 % para las categorías de plantas “Registrada” y “Certificada”, no

son suficientes para tomar la decisión de rechazar o aceptar el lote. En la gráfica **4-7** y **4-8** se observa que las probabilidades de aceptar lotes de mala calidad son muy altas para estos tamaños de lote y van decreciendo a medida que el tamaño del lote tiende a infinito. Para tamaños de lote muy grandes, el muestreo a proporción fija genera tamaños de muestra muy elevados que tienen un riesgo inferior, pero a un costo demasiado alto.

Los planes de muestreo obtenidos siempre cumplen con los riesgos establecidos y generan tamaños de muestra razonables, es decir, se optimiza al máximo los costos asociados al muestreo, cumpliendo con los riesgos requeridos. Además, presentan una gran ventaja en términos de convergencia, ya que cuando el tamaño del lote tiende a infinito, los tamaños de muestra convergen a un valor, no crecen indefinidamente como el muestreo a proporción fija de la normativa actual.

Las tablas **4-3**, **B-1** y **B-2** son una alternativa útil para obtener los planes de muestreo en caso de no contar con recursos computacionales, sin embargo, a pesar de que estos tamaños de muestra aseguran los riesgos asumidos para todo el intervalo de tamaños de lote, para tamaños de lote que estén cerca al limite inferior de cada intervalo se incurre en un sobrecosto innecesario. Esto ocurre ya que al generalizar un solo tamaño de muestra para los clusters conformados tal que cumpla con los riesgos asumidos para todo el intervalo, se debe seleccionar el tamaño de muestra más alto. Es evidente que bajo esta generalización se pierde exactitud y los planes no son óptimos en términos de costos para todos los tamaños de lote.

La estrategia de selección de la muestra basada en el muestreo por conglomerados bietápico garantiza la aleatoriedad y la independencia, y facilita la conformación de la muestra en cuanto a optimización del tiempo y recursos logísticos.

## 5.2. Recomendaciones

Teniendo en cuenta que no hay datos disponibles sobre la calidad histórica de los lotes, se recomienda aplicar la metodología expuesta por un tiempo considerable, estableciendo un archivo de datos de la calidad entregada por cada productor. Posteriormente, cuando se considere que se tienen los suficientes datos, agrupar los productores con respecto a su calidad en por ejemplo, tres clusters, calidad “tipo A”, “tipo B” y “tipo C”, y establecer los riesgos de muestreo dependiendo del grupo al que pertenezca cada productor. Para un productor “tipo A” se podrán asumir riesgos más altos, disminuyendo sus costos en el muestreo, mientras que para un productor “tipo C” se deberán asumir riesgos más bajos, obteniendo tamaños de muestra mayores y aumentando sus costos de evaluación. Esto a largo plazo motivará a los productores a mantener sus niveles de calidad y a mantenerse en el grupo “tipo A”, lo

cual generará una ganancia tanto para ellos como para los consumidores.

Buscar o proponer alternativas para el agrupamiento y conformación de la tabla **4-3** logrando que el tamaño de muestra sea óptimo en términos económicos y se evite utilizar la aplicación en caso de no contar con herramientas computacionales.

Validar en campo de forma experimental la propuesta de selección de la muestra, realizando comparaciones con otras estrategias de selección, enfatizando en los tiempos asociados y efectividad. Por ejemplo, tener un lote experimental y plantas de control infectadas; mezclarlas en el lote de forma aleatoria, y aplicar diferentes métodos de selección, comparar tiempos y cantidad de veces que se extrae al menos una planta infectada en la muestra. Repetir el procedimiento varias veces, permitiendo obtener el método de selección más adecuado.

# A. Anexo: Guía de observación

**GUÍA DE OBSERVACIÓN: VISITA VIVEROS**

1. **Datos del vivero**

   **Nombre** _____

   **Lugar** _____

2. **Categoría de vivero: Productores, multiplicadores**

   **Productores___** **Multiplicadores___**

3. **Tamaño de lotes; (número de plantas en el lote).**

   **Pequeños___** **Medianos___** **Grandes___**

   **Cantidad de plantas**_____

4. **Riesgo cliente: Si se vendieran 100 lotes de plantas, ¿en cuántos de esos lotes está dispuesto a devolver el dinero o a cambiar el lote en caso de que el lote salga infectado?**

   _____

   _____

5. **¿Cómo se establece la estructura de las plantas dentro de los lotes? (Forma, Espacio entre planta y planta, orden, dimensión)**

   _____

   _____

6. **¿Cuál es el criterio de estratificación? (¿Cómo se rotan las plantas en el lote a lo largo del proceso?)**

   _____

   _____

7. **¿Qué precauciones se toman para evitar infecciones?**

   _____

   _____

8. **¿Qué estrategia tienen actualmente para evaluar los lotes que se van a vender?**

   _____

   _____

9. **¿Se han realizado muestreos anteriormente? ¿En qué cantidad y de qué manera se ha realizado?**

   _____

   _____

10. **¿En qué edades de la planta se realiza el muestreo? ¿Cómo se hace el muestreo dentro de la planta? (Hojas, Ramas, etc.)**

    _____

    _____

11. **¿Con qué periodicidad podría hacer muestreos para detectar si tiene plantas infectadas? ¿Cuál sería su estrategia? (¿Qué porcentaje muestrearía y Cómo?)**

    _____

    _____

    _____

12. **¿Qué porcentaje de plantas del lote es lo máximo que se podría analizar en términos de costos? _____**

**OBSERVACIONES**

_____

_____

_____

# B. Anexo: Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$)

**Tabla B-1**.: Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$) para $RQL = 0.01$.

| **Riesgo máximo tolerable ($\beta_{max}$)** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0.01** | | **0.05** | | **0.1** | | **0.2** | |
| **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** | **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** | **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** | **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** |
| 1 a 40 | 36 | 1 a 40 | 31 | 1 a 20 | 18 | 1 a 20 | 16 |
| 41 a 60 | 47 | 41 a 60 | 38 | 21 a 40 | 28 | 21 a 40 | 22 |
| 61 a 80 | 54 | 61 a 80 | 42 | 41 a 60 | 32 | 41 a 60 | 25 |
| 81 a 100 | 59 | 81 a 100 | 45 | 61 a 80 | 35 | 61 a 80 | 26 |
| 101 a 120 | 63 | 101 a 140 | 48 | 81 a 120 | 38 | 81 a 100 | 27 |
| 121 a 140 | 67 | 141 a 180 | 50 | 121 a 180 | 40 | 101 a 120 | 28 |
| 141 a 160 | 69 | 181 a 320 | 54 | 181 a 520 | 43 | 121 a 380 | 31 |
| 161 a 200 | 73 | Más de 320 | 59 | Más de 520 | 45 | Más de 380 | 32 |
| 201 a 280 | 77 | | | | | | |
| 281 a 520 | 83 | | | | | | |
| Más de 520 | 90 | | | | | | |

**Tabla B-2**.: Tamaños de lote ($N$) agrupados por tamaños de muestra ($n$) para $RQL = 0.1$.

| **Riesgo máximo tolerable ($\beta_{max}$)** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0.01** | | **0.05** | | **0.1** | | **0.2** | |
| **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** | **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** | **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** | **T. lote ($N$)** | **T. muestra ($n$)** |
| 1 a 20 | 18 | 1 a 20 | 16 | 1 a 20 | 14 | 1 a 10 | 8 |
| 21 a 30 | 23 | 21 a 30 | 19 | 21 a 30 | 16 | 11 a 20 | 11 |
| 31 a 40 | 27 | 31 a 40 | 21 | 31 a 40 | 17 | 21 a 40 | 13 |
| 41 a 50 | 29 | 41 a 50 | 22 | 41 a 50 | 18 | 41 a 80 | 14 |
| 51 a 60 | 31 | 51 a 60 | 23 | 51 a 70 | 19 | Más de 81 | 16 |
| 61 a 70 | 33 | 61 a 80 | 24 | 71 a 120 | 20 | | |
| 71 a 80 | 34 | 81 a 100 | 25 | Más de 121 | 22 | | |
| 81 a 110 | 36 | 101 a 280 | 27 | | | | |
| 111 a 150 | 38 | Más de 280 | 29 | | | | |
| 151 a 310 | 41 | | | | | | |
| Más de 310 | 44 | | | | | | |

# Bibliografía


Achachia, A., Barka, E. A. & Ibriz, M. (2014), Recent advances in citrus psorosis virus, *in* S. India, ed., 'VirusDisease', pp. 261 – 276.

Aguilar, P., José, M., Quijano, E., Pedro, C. & Carvalho, C. (2020), 'Situación actual de la cadena de cítricos en colombia: limitantes y perspectivas'.

Bastianel, M. et al. (2010), *Citrus Leprosis: Centennial of an unusual mite-virus pathosystem*, Vol. 94, Plant Disease, pp. 284 – 292.

Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y. & McPherson, J. (2019), *shiny: Web Application Framework for R.* R package version 1.3.2.
**URL:** *https://CRAN.R-project.org/package=shiny*

Duran-Vila, N. (1997), 'La problemática de los viroides (exocotis y xiloporosis) en las nuevas plantaciones de cítricos', *Levante Agrícola* **341**, 330 – 338.

Duran-Vila, N. (2017), Chapter 16 - citrus exocortis viroid, *in* A. Hadidi, R. Flores, J. Randles & P. Palukaitis, eds, 'Viroids and Satellites', Academic Press, Boston, pp. 169 – 179. `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128014981000164`.

Faggiani, E. P. (2009), Hlb: Aspectos generales de la enfermedad, Technical report, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

Garnsey, S. (1991), 'Enzyme-linked immunosorbent assay (elisa) for citrus pathogens', *Graft-transmissible diseases of citrus. Handbook for detection and diagnosis* pp. 193–216.

Gottwald, T. & Hughes, G. (2000), A new survey method for citrus tristeza virus disease assessment, *in* 'International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings (1957-2010)', Vol. 14.

Hughes, G. & Gottwald, T. (1999), 'Survey methods for assessment of citrus tristeza virus incidence when toxoptera citricida is the predominant vector', *Phytopathology* **89**(6), 487–494.

ICA (2019), Resolución n. 12816, Technical report, Colombia.

Izquierdo, E. V. (2010), Epidemiología de Plum pox virus y Citrus tristeza virus en bloques de plantas de vivero. Métodos de control, PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Kleinn, C. & Vilko, F. (2007), On estimation in k -tree sampling.

Luca, S., Vandercappellen, J. & Claes, J. (2020), 'A web-based tool to design and analyze single- and double-stage acceptance sampling plans', *Quality Engineering* **32**(1), 58–74.

MADR (2019), Cadena de citricos: Indicadores e instrumentos, Technical report, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. `https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2019-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf`.

Matos, L. & Borbón, J. (2008), 'El virus de la tristeza de los citricos (ctv) en plantaciones comerciales y viveros de la república dominicana', *Caribbean Food Crops Society* **44**(2), 204–211.

Motz, K., Sterba, H. & Pommerening, A. (2010), 'Sampling measures of tree diversity', *Forest Ecology and Management* **260**(11), 1985 – 1996.
**URL:** *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112710005177*

*NIFM n.27 Anexo 15: Virus de la tristeza de los cítricos* (2016), Technical report, Convención Internacional de Protección Fitosanitaria, Roma.

*NIFM n.5 Glosario de Términos Fitosanitarios* (2017), Technical report, Convención Internacional de Protección Fitosanitaria.

*NIMF n. 31 metodologías para muestreo de envíos* (2008), Technical report, Convención Internacional de Protección Fitosanitaria.

Parke, J. L., Knaus, B. J., Fieland, V. J., Lewis, C. & Grünwald, N. J. (2014), 'Phytophthora community structure analyses in oregon nurseries inform systems approaches to disease management', *Phytopathology* **104**(10), 1052–1062.

Paulo, M. J., Tomé, M., Otten, A. & Stein, A. (2005), 'Comparison of three sampling methods in the characterization of cork oak stands for management purposes', *Canadian Journal of Forest Research* **35**(10), 2295–2303.

Paz, R. C. & Gómez, D. G. (2000), *Administración de las operaciones: Muestreo de aceptación*, Nueva libreria.

Pérez, C. (2010), *Técnicas de muestreo estadístico*, 1 edn, Garceta, Madrid.

R Core Team (2019), *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
**URL:** *https://www.R-project.org/*

Rodríguez, J. & Cagua, D. (2012), 'Generalidades de los cítricos y recomendaciones agronómicas para su cultivo en colombia'.

Rojas, A. R.-F. (2006), Notas de clase: Muestreos de aceptación.

Squeglia, N. L. (2008), *Zero Acceptance Number Sampling Plans*, 5 edn, ASQ Quality Press.

White, K. P., Johnson, K. L. & Creasey, R. R. (2009), 'Attribute acceptance sampling as a tool for verifying requirements using monte carlo simulation', *Quality Engineering* **21**(2), 203–214.