

Sistema de monitoreo y diagnóstico no invasivo del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*Solanum tuberosum*) mediante análisis de imágenes de indicadores fisiológicos externos

Asmaza Villacorte Diego Alexander
Culchá Cupacan Hernán Alejandro

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Ingeniería electrónica
Pasto
2022

Sistema de monitoreo y diagnóstico no invasivo del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*Solanum tuberosum*) mediante análisis de imágenes de indicadores fisiológicos externos

Asmaza Villacorte Diego Alexander
Culchá Cupacan Hernán Alejandro

Informe final de trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería electrónica para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Asesor:
Diego Jair Rodriguez Obando

Universidad CESMAG
Facultad de ingeniería
Ingeniería electrónica
Pasto
2022

Contenido

1.	Introducción	16
2.	Problema de Investigación	19
2.1	Objeto o tema de investigación	19
2.2	Línea de investigación	19
2.3	Sub-línea de investigación	19
2.4	Descripción o planteamiento del problema	20
2.5	Formulación del problema	24
2.6	Objetivos	24
2.6.1	Objetivo General.....	24
2.6.2	Objetivos Específicos.....	24
2.7	Justificación	24
2.8	Delimitación.....	26
3.	Marco teórico – contextual	27
3.1	Contexto.....	27
3.2	Antecedentes	28
3.2.1	Características de la planta de papa (<i>solanum tuberosum</i>).	28
3.2.2	Determinación fotogramétrica del área foliar de la planta de papa (<i>solanum tuberosum</i>). 28	
3.2.3	Método cuantitativo para medir el área foliar de la planta de papa (<i>solanum tuberosum</i>) a través de imágenes digitales.	29
3.2.4	Diagnóstico del estado de salud en los cultivos.	29
3.2.5	Monitoreo asistido de plantaciones agrícolas.....	30
3.2.6	Sistema de monitoreo de parámetros agrícolas para la supervisión de cultivos de manera remota basado en redes de sensores inalámbricos.....	31

3.2.7	Determinación del área foliar en fotografías tomadas con cámaras digitales. .31	31
3.2.8	Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda sobre cuatro variedades de papa (<i>solanum tuberosum</i>).	31
3.2.9	Características biométricas de un cultivo de papa.	32
3.2.10	Determinación del área foliar en papa (<i>solanum tuberosum</i>) por medio de fotografías digitales con relación al número de pixeles y altura de adquisición.	32
3.2.11	Medición automática del área de afectación por sigatoka negra en imágenes de la hoja de plátano.	33
3.2.12	Un método cuantitativo para medir el área del tubérculo dañado por larvas de <i>Tecia solanivora</i> (Lep.; Gelechiidae) a través de análisis de imágenes digitales.	34
3.3	Enunciados de los supuestos teóricos.	34
3.3.1	Tubérculo de la papa.	34
3.3.2	Diagnóstico no invasivo.	35
3.3.3	Indicadores fisiológicos externos.	35
3.3.4	Análisis de imágenes por medio de algoritmos computacionales	35
3.4	Definición de conceptos.	36
3.4.1	Variable.	36
3.4.2	Cómo se define con el contexto.	36
3.4.3	Cómo se mide.	36
3.5	Hipótesis.	37
4.	Metodología	38
4.1	Enfoque.	38
4.2	Paradigma	38
4.3	Método.	38
4.4	Tipo de investigación	38
4.5	Diseño de investigación.	39

4.6	Universo.....	40
4.7	Muestra	41
4.8	Técnicas de recolección de información	41
4.8.1	Validez técnica.	41
4.8.2	Confiabilidad técnica.	42
4.8.3	Instrumentos de recolección de información.....	42
4.9	Definición de los índices fisiológicos de la planta de papa (<i>solanum tuberosum</i>) relevantes para ser monitoreados electrónicamente.....	43
4.9.1	Parámetros de medida e identificación del estado del tubérculo de la papa para la clasificación y entrenamiento de la red neuronal.	43
4.9.2	Superficie foliar.	44
4.9.3	Color.....	44
4.9.4	Irregularidades de color.....	44
4.9.5	Irregularidades de borde (Morfología).....	44
5.	Desarrollo Experimental.....	45
5.1	Diseño de Experimento para la metodología utilizada para la toma de datos	45
5.2	Diseño de estación meteorológica de soporte.....	45
5.3	Diseño dispositivo prototipo para la toma de datos.	47
5.4	Sistema de diagnóstico	47
5.5	Diseño base de datos.	48
5.6	Caracterización de imágenes obtenidas a partir de la base de datos de las hojas durante el proceso de evolución de cada una de ellas.	49
5.7	Corroboración de los datos cuantificados a partir de la toma de imágenes utilizando el software Matlab	50
5.8	Construcción de los datos obtenidos a partir de la cuantificación de las imágenes.	

5.9	Obtención de los tubérculos al llegar al final del tiempo de vida de la planta. ...	51
5.10	Caracterización de los tubérculos obtenidos de cada planta.	51
5.11	Construcción base de datos de caracterización de tubérculos de cada planta.....	53
5.12	Base de datos y comportamiento de variables meteorológicas durante el transcurso de desarrollo de la investigación.	54
6.	Resultados y Análisis.....	55
6.1	Caracterización de las variables obtenidas a partir de la cuantificación de las imágenes	55
6.2	Base de datos de caracterización de los tubérculos.	55
6.3	Base de datos de las variables medidas de la estación meteorológica.	56
6.4	Estadística descriptiva básica de datos.	57
6.5	Evolución hojas en el tiempo.	60
6.6	Pendientes del crecimiento foliar de las hojas	63
6.7	Comparaciones a partir de los datos obtenidos de las imágenes y de los tubérculos	64
6.8	Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con número de tubérculos por planta.	64
6.9	Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con peso promedio de tubérculos por planta.	66
6.10	Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con Tamaño longitudinal promedio por planta.	68
6.11	Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con Tamaño Transversal promedio por planta.	70
6.12	Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con promedio volumen de tubérculos por planta.	71
6.13	Modelado y pronóstico.	75
7.	Conclusiones y Recomendaciones	79

Referencias	81
Anexos.....	83

Lista de tablas

Tabla 1. Características y propiedades de la planta de papa de estudio.....	43
Tabla 2. Determinación de número de plantas en estudio.....	45
Tabla 3. Cuantificación de imágenes de base de datos de hojas.. ..	55
Tabla 4. Caracterización de tubérculos obtenidos posteriormente a la cosecha.....	55
Tabla 5. Monitoreo de estación meteorologica. . Fuente: Esta investigación.	56
Tabla 6. Pendientes promedio 10 plantas en estudio	63
Tabla 7. Promedio Tubérculos.....	64
Tabla 8. Correlación promedio de plantas con Número de Tubérculos por Planta	65
Tabla 9. Pendientes promedio de plantas con Peso promedio de Tubércilos por Planta.....	67
Tabla 10. Correlación promedio de Plantas con Tamaño Longitudinal de Tubérculos	68
Tabla 11. Correlación promedio de la Plantas con Tamaño Transversal de Tubérculos.....	70
Tabla 12. Correlación Pendientes promedio de las Plantas con Volumen de Tubérculos...	72
Tabla 13. Parámetros p mediante regresión lineal de perímetro foliar.	76
Tabla 14. Parámetros P mediante regresión lineal de área foliar.	76

Lista de Figuras

Figura 1. Planta de papa.	20
Figura 2. Del monitoreo a la toma de decisiones.....	23
Figura 3. Ubicación geográfica del cultivo donde se aplicó el monitoreo y diagnóstico	27
Figura 4. Cultivo de papa donde se desarrolló la investigación y se aplicó el sistema.....	28
Figura 5. Diagrama metodología realizada.	40
Figura 6. Base de datos de imágenes fotográficas	43
Figura 7. Diagrama de bloques. Estación meteorológica.	46
Figura 8. Plano esquemático. Estación meteorológica.....	46
Figura 9. Estación meteorológica de soporte	46
Figura 10. Dispositivos para la toma de datos.....	47
Figura 11. Muestra el dispositivo en la toma de datos registrando una hoja	48
Figura 12. Diseño de base de datos.....	49
Figura 13. Caracterización de imágenes	50
Figura 14. Caracterización de imágenes. A partir del software Matlab.....	50
Figura 15. Muestras obtenidas de las 10 plantas.	51
Figura 16. Peso del tubérculo.	52
Figura 17. Volumen del tubérculo.	52
Figura 18. Etiqueta del tubérculo.....	53
Figura 19. Base de datos. Estación meteorológica y comportamiento.	56
Figura 20. Caracterizados en peso.	57
Figura 21. Caracterización en Tamaño transversal.....	58
Figura 22. Caracterización en Tamaño longitudinal final.....	59
Figura 23. Caracterización en volumen.....	59
Figura 24. Caracterizados en densidad.....	60
Figura 25. Evolución Área Foliar hojas.	61
Figura 26. Evolución perímetro foliar hojas.....	61
Figura 27. Evolución Circularidad Foliar hojas.	62
Figura 28. Evolución Altura Foliar hojas.....	62
Figura 29. Evolución Anchura Foliar hojas.	63
Figura 30. Correlación de pendiente promedio perímetro foliar vs número de tubérculos .	65

Figura 31. Correlación de promedio perímetro foliar vs Peso prom de tubérculos.....	67
Figura 32. Correlación de pendiente Área foliar vs Tamaño longitudinal de tubérculos	69
Figura 33. Correlación de pendiente Área foliar vs Tamaño Transversal de tubérculos.....	71
Figura 34. Correlación de promedio perímetro foliar vs promedio volumen tubérculos....	72
Figura 35. Evolución del perímetro foliar con respecto a los datos meteorológicos.....	73
Figura 36. Pendiente crecimiento Área foliar.....	75
Figura 37. Pendiente crecimiento Perímetro foliar	75
Figura 38. Modelo polinómico de tercer orden de ajuste de los datos del área foliar	77
Figura 39. Modelo polinómico de tercer orden de ajuste de los datos del perímetro foliar.	77
Figura 40. Aprendizaje histórico del modelo de polinomio de tercer orden de perímetro foliar en el tiempo	78

Anexos

Anexo 1. Fotos del proceso de toma de imágenes	83
Anexo 2. Base de datos no paramétrica	83
Anexo 3. Planos estación meteorológica.....	84
Anexo 4. Base de datos de cuantificación y caracterización de imágenes y tubérculos	85
Anexo 5. Código estación meteorológica.....	85

Nota de aceptación

Aprobado por el comité curricular del programa
De Ingeniería Electrónica en cumplimiento de los
Requisitos exigidos por la Universidad CESMAG
Para optar por el título de Ingeniero Electrónico.

Diego Rodriguez, Asesor

Jurado

Jurado

Página de Nota de Exclusión de Responsabilidad Intelectual

“El pensamiento que se expresa en esta obra es
Exclusivamente responsabilidad de su autor y
no compromete la ideología de la Universidad
CESMAG”

El presente trabajo de investigación lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerzas para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en los que somos. Ha sido un orgullo y un privilegio el ser sus hijos, son los mejores padres.

A nuestros familiares y amigos cercanos por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral que nos brindaron a lo largo de esta etapa en nuestras vidas. A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos, aportando a nuestra formación tanto profesional y como seres humanos.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

Gracias a nuestros padres: William y Milena; y, Alberto y Carmen, por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

A todos nuestros amigos, vecinos y futuros colegas que nos ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

Agradecemos a nuestros docentes de la Universidad CESMAG, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión.

Finalmente queremos expresar nuestros más grandes y sinceros agradecimientos al PhD. Diego Rodríguez, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo guiándonos con su paciencia, y su rectitud.

1. Introducción

El presente trabajo de grado tiene como principal objetivo realizar un análisis diagnóstico del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*Solanum tuberosum*) por medio de la medición no invasiva con instrumentación electrónica de indicadores fisiológicos de salud de la planta basados en análisis de imágenes. Las hojas se constituyen como una fuente sustancial para el desarrollo del tubérculo durante todo el proceso de crecimiento, a la vez poseen indicadores ampliamente estudiados relacionados con su forma y color; de allí que el interés primordial es realizar un proceso de medición en forma indirecta con el propósito de no alterar su integridad ni el de la planta, incluido el tubérculo que es la parte de mayor interés. Usualmente, para algunas plantas agrícolas como la papa, interesa estudiar si a partir de los indicadores de salud de la planta se puede estimar si ésta llegará o no al tiempo de cosecha en condiciones óptimas. Por supuesto que el pronóstico depende de una relación compleja de factores, pero en todo caso debe siempre basarse en un diagnóstico aceptable técnicamente. El propósito del trabajo es aportar un estudio sobre el diagnóstico basado en datos obtenidos con instrumentación electrónica, enfocado a futuros avances en el pronóstico.

Debido a que, en la actualidad para pequeños y medianos productores, el proceso tradicional de verificación del estado de salud de las plantas individuales de papa está sujeto a la observación por parte del humano, este tipo de observación depende principalmente de la experticia del agricultor. Esta última se constituye en una información vital; sin embargo, se produce una baja precisión y exactitud del diagnóstico y pronóstico causada por errores sistemáticos de medición a la hora de realizar el diagnóstico de estado de salud de la planta de papa. Adicionalmente, dado que el elemento de mayor interés en la planta de papa es su tubérculo y puesto que no hay una forma eficiente y práctica de estimar su estado sin dañar la planta, la medición del estado de salud de ese tubérculo depende de inspección indirecta externa. Entonces, un propósito derivado de esta investigación es mejorar la observación del estado de salud de la planta de papa (*solanum tuberosum*) en la variedad ICA Única con el fin de proporcionar una herramienta útil para el humano, la cual se basa en un sistema de monitoreo electrónico para evaluar los indicadores fisiológicos de salud de la planta.

Un propósito fundamental del trabajo fue contribuir potencialmente a la mejor administración de los recursos económicos como materiales e insumos y también del tiempo, evitando al máximo su desperdicio. La investigación de esta problemática se realiza para

potencialmente a futuro ayudar a conocer el tiempo de vida de las plantas individuales de papa, esto permitiría identificar cuál sería el estado de la planta de papa al llegar a su tiempo de cosecha con menor incertidumbre. Este proceso redundaría en una mejor toma de decisiones de manejo y descarte tempranos por parte del agricultor (Briyith et al., 2017).

Esta investigación está en consonancia con el acontecer actual internacional y local. Por ejemplo, la seguridad alimentaria, y en consecuencia el mejoramiento de los procesos de agricultura, hace parte de los objetivos principales de desarrollo a nivel mundial (FAO, 2020). Además, las actuales condiciones de recesión (disminución o pérdida generalizada de la actividad económica de un país o región) debidas a la crisis sanitaria internacional a raíz de la COVID-19 y la oportunidad de los procesos de producción locales (Santos, 2010) justifican la realización de esfuerzos en investigación para el mejoramiento de toma de decisiones productivas.

En el ámbito local, la línea productiva de la papa ha sido priorizada en el Plan de Desarrollo Departamental de Nariño (Rojas, 2020). Esto debido a que por años, la papa se ha convertido en uno de los principales productos a cultivarse en el departamento de Nariño, tanto para consumo interno como para exportación nacional (Fedepapa, 2018; Martínez et al., 2020). Las principales brechas de competitividad están en la comercialización y la agregación de valor, además los rendimientos observados en los últimos 12 años, reflejan la persistencia por décadas de brechas tecnológicas que evitan aumentar su productividad (Martínez et al., 2020). De allí que la realización de investigación local multidisciplinaria e interdisciplinaria en torno a la papa es pertinente tanto en su utilidad como en su viabilidad.

La presente investigación se realizó como trabajo de grado para optar al título de Ingeniero electrónico. En este contexto se planteó como un trabajo en el que se permite evidenciar las competencias desarrolladas de los autores en el área de ingeniería electrónica. Así, el objetivo general de la investigación es realizar un análisis diagnóstico del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*Solanum tuberosum*) por medio de la medición no invasiva con instrumentación electrónica de indicadores fisiológicos de salud de la planta basados en análisis de imágenes. En forma análoga, esta medición debía estar orientada a la aplicación de una posterior metodología a futuro que permitiría lograr un estimado de la probabilidad de que las plantas lleguen exitosamente al tiempo de cosecha, uno de los resultados esperados de esta investigación, es que motive otras investigaciones a que profundicen en esta línea.

La investigación es de enfoque empírico analítica, de tipo investigación aplicada. Las pruebas para realizar esta investigación se realizaron en el municipio de Túquerres - corregimiento de Santander en un cultivo de aproximadamente 16.000 plantas de papa de las cuales se seleccionaron 10 que estuvieron en igualdad de condiciones. En cuanto a la metodología a realizar, en primer lugar, se definió las plantas a realizarles las pruebas, sus características de ubicación en la plantación y cultivo, y las variables de verificación de condiciones ambientales. Esto permitió establecer un escenario propicio para la toma de datos y la experimentación. Para este contexto, se monitoreó principalmente variables clásicas como la temperatura y la humedad. En segundo lugar, se diseñó e implementó el sistema electrónico de monitoreo a partir del análisis de imágenes digitales de la planta para el mejoramiento del diagnóstico. Este sistema tiene como condición de diseño su orientación hacia el potencial pronóstico de los estados fisiológicos de salud de las plantas de papa. Para esto, se parte de la potencialización de información científica disponible y del juicio de expertos basado en la observación de las plantas por parte del humano. En tercer lugar, se realizó un desarrollo experimental que tiene como propósito la potencial creación de herramientas para la toma de decisiones de descarte y selección por parte del agricultor. La decisión sobre las herramientas de análisis específicas del sistema de monitoreo electrónico es parte de los objetivos del proyecto.

En el [Capítulo 2](#) se muestra el problema de investigación, en qué contexto se encuentra la propuesta de investigación y por qué interesa este tema de investigación. Luego, en el [Capítulo 3](#), se expone el marco teórico – contextual. En el [Capítulo 4](#) se expone la metodología, en donde también se describe la estructura de actividades y pasos para los diseños experimentales. También, en el [Capítulo 5](#) se muestra toda la fase de desarrollo experimental, que incluye el diseño y la fase de implementación. En el [Capítulo 6](#) se muestran los resultados que se obtuvieron en el transcurso de todo el proyecto con su correspondiente análisis. De aquí se destacan los resultados correlacionales basados en análisis de imágenes, y resultados de probabilidades de distribución de características de hojas y tubérculos. Al final, se presentan las [conclusiones y recomendaciones](#) para trabajo futuro además de los [anexos](#).

2. Problema de Investigación

2.1 Objeto o tema de investigación

Monitoreo y diagnóstico las plantas de papa (*Solanum tuberosum*), a partir de la medición electrónica de indicadores fisiológicos de salud orientada al pronóstico de su tiempo de vida.

2.2 Línea de investigación

Automatización y control. “El área de sistemas de automatización y control de la Universidad CESMAG desarrolla procesos investigativos orientados al modelamiento, simulación, diseño, desarrollo y evaluación de algoritmos de control, sistemas de control, sistemas inteligentes, control de procesos industriales, sistemas embebidos, acondicionamiento y procesamiento de señales, robótica, domótica e inteligencia artificial” (Electrónica, 2015). La presente investigación pertenece a esta línea ya que propone desarrollar simulaciones, diseño, sistemas de control, acondicionamiento y procesamiento de señales que permitiría tener mejores resultados en cuanto al objetivo del proyecto.

2.3 Sub-línea de investigación

Biometría. “La línea de investigación en biometría hace referencia a la identificación medición y análisis de las características fisiológicas y de comportamiento de un individuo a través del uso combinado de sistemas hardware y software” (Electrónica, 2015). La investigación está ligada a esta sub-línea de biometría ya que hace referencia a la medición y análisis de características fisiológicas externas de las hojas de la planta y también en su comportamiento (cambio de forma).

Parte de la investigación en cuanto al análisis de imágenes se desarrolló en la Universidad CESMAG, en el programa de ingeniería electrónica, el cual es un programa académico que busca explotar la creatividad de sus estudiantes en resolución de problemas, necesidades o requerimientos del entorno regional, nacional e internacional a través de la idea del diseño, la implementación y la intervención de los dispositivos electrónicos de acuerdo con el objeto de estudio.

2.4 Descripción o planteamiento del problema

La papa (*solanum tuberosum*) es considerada como alimento básico en la canasta familiar, el tubérculo originario de Perú ha sido cultivado desde hace más de 8000 años (Bioenciclopedia, 2015). En la actualidad se convirtió en uno de los principales alimentos en el mundo, hasta el momento se conocen 5000 variedades de papa, la papa es el cuarto producto alimenticio en el mundo solo por debajo del trigo, maíz y el arroz. En la Figura 1 se muestra una visión esquemática de una planta individualizada de papa (*solanum tuberosum*).

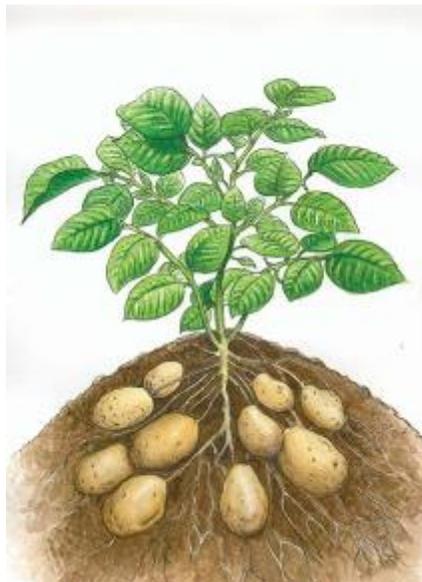


Figura 1. Planta de papa (*solanum tuberosum*). Muestra la planta de papa a la cual se implementará el sistema de monitoreo electrónico. Tomada de Biopedia [imagen]. www.biopedia.com

Para el caso de los sistemas biológicos, el estado de salud se realiza por medio de la medición de variables fisiológicas. En el caso específico de las plantas de papa (*Solanum tuberosum*), en este caso para nuestro tubérculo en estudio que corresponde a la variedad de ICA Única que tiene algunas características en la planta como tener porte alto, tallos vigorosos de color oscuro, follaje verde oscuro, folíolos primarios grandes, floración profusa de corta duración, flores de color lila. Y a la hora de obtener el tubérculo algunas características que presenta son un alto porcentaje de tubérculos de tamaño grande a muy grande, producción uniforme, forma redonda algo alargada, color de la piel crema-marrón con la yema de los ojos color rosado. También esta variedad en cuanto a la reacción de enfermedades tiene una alta resistencia a las razas predominantes de gota (*phytophthora infestans*) y a las polillas

(*Phthorimaea operculella* (Zeller), *Tecia solanivora*). Algunas características agronómicas de este tubérculo es el rendimiento promedio de esta variedad, evaluado en alturas entre los 2.600 y 3.200 m.s.n.m se encuentra entre los 30 y 45 t/ha (toneladas por hectárea). El periodo vegetativo es de 150 a 165 días. Los indicadores de salud se relacionan principalmente con la observación del estado de sus componentes principales tales como el tallo, las hojas o las flores. Por ejemplo, el tamaño, color y forma de dichas partes de la planta puede dar una medida indirecta y no invasiva de la parte de mayor interés de la planta que es el tubérculo.

Para algunas plantas de interés agrícola como la papa (*Solanum tuberosum*), interesa estudiar si a partir de los indicadores de salud de la planta se puede estimar si ésta llegará o no al tiempo de cosecha en condiciones óptimas. Para extraer el tubérculo, que es la parte más útil de la planta, es necesario que la planta llegue a su tiempo de vida óptimo en la mejor condición de salud; una vez cosechado el tubérculo, el resto de la planta se considera generalmente descartada y muere.

En la actualidad, el proceso de verificación del estado de salud de las plantas individuales de papa está sujeto a la observación por parte del humano. Este tipo de inspección requiere esencialmente de la pericia del agricultor, la cual se establece como una información indispensable; sin embargo, este tipo de observación es ineficiente en el tiempo, debido a la dificultad inherente del humano para revisar cada planta de papa en un cultivo con exactitud y precisión. En consecuencia, el proceso actual conlleva a una considerable tasa de error y a una baja repetibilidad del diagnóstico, que se puede sintetizar en la situación problemática **P1**:

P1 Alta tasa de error y baja repetibilidad en el proceso actual de diagnóstico del estado general de salud de la planta.

En forma complementaria, se observa que, para el cultivo de tubérculos, el resultado exitoso y cosecha coincide con el fin de vida de la planta cultivada. De allí que todo proceso realizado desde la siembra y cuidado de la planta se evidencia finalmente en la cosecha de un producto que no se ve desde las fases iniciales. Sin un diagnóstico práctico y sistemático, el pronóstico será igualmente inexacto. Esto se puede plantear la situación problemática P2 sobre el pronóstico del estado futuro y sobre la tasa de éxito en la producción del tubérculo.

P2 Baja exactitud en la predicción de características del tubérculo resultante.

Si el análisis de las plantas sigue haciéndose de forma manual, es posible que los errores sistemáticos de medición continúen como se vienen dando hasta la actualidad, ocasionando baja precisión y exactitud a la hora de diagnosticar el estado de salud de la planta de papa (*solanum tuberosum*). Adicionalmente, dado que el elemento de interés en la planta de papa es su tubérculo, la medición del estado de salud de ese tubérculo depende de medidas indirectas que se pueden hacer por fuera de la planta, puesto que no hay una forma de ver el estado del tubérculo sin dañar la planta. Por lo tanto, con esta investigación se espera contribuir al análisis que se viene haciendo de forma manual para disminuir los posibles efectos generados por la baja eficiencia en la obtención de dicho conocimiento que pueden redundar en baja repetibilidad, baja productividad y/o baja calidad del producto. Esta situación se puede plantear en la situación problemática **P3**:

P3 La medición directa e invasiva sobre el tubérculo implica en la práctica la muerte del objeto de estudio.

Durante el crecimiento del tubérculo, la planta misma se constituye en una fuente de diversos indicadores de salud (Carranza, 2017). En este caso interesa ver si este estado de los elementos verificables de la planta tiene relación con el estado del tubérculo. Así las cosas, la observación de los elementos externos de la planta sería una forma de analizar indirectamente y en forma no invasiva el estado del tubérculo. Esto se puede sintetizar en el supuesto **S1**:

S1 El estudio sobre las hojas de la planta provee potencialmente una visión indirecta de otras características morfológicas y funcionales de la planta de papa.

Actualmente, la medición y estimación de indicadores de salud de las plantas por medio de la instrumentación electrónica, ha presentado avances notorios que aumentan la eficiencia del análisis del estado actual de las plantas. En esta investigación, se planteó que dicha observación puede realizarse a partir de la observación de imágenes digitales de las hojas. Esto se sintetiza en el supuesto **S2**:

S2 El estudio de indicadores fisiológicos de las hojas de la planta por medio del análisis de imágenes puede arrojar información de interés para mejorar el diagnóstico de la planta.

Con esta investigación se espera aportar con la implementación del monitoreo y diagnóstico electrónico orientado al pronóstico del estado de salud de las plantas de papa y del producto final que es el tubérculo. En la **Error! Reference source not found.** se muestra el esquema general de la concepción previa de un sistema de monitoreo y diagnóstico de las plantas. El objetivo de la investigación va dirigido al manejo de la información que parte de plantas de muestra, y que se monitorean durante un tiempo, por medio de la obtención periódica de información. Con esta información la idea es realizar un proceso de análisis de imágenes para diagnosticar el estado de salud de las hojas (e indirectamente de la planta). Esta información, junto con hipótesis razonables sobre el futuro, podría servir para realizar un correcto pronóstico. Esta investigación se orienta hacia el pronóstico; es decir, se pretende como propósito que el esquema propuesto provea la información de manera tal que sea viablemente utilizada para efectos predictivos en investigaciones futuras. A partir de estos datos obtenidos se podría partir a realizar investigaciones para posibles pronósticos del tiempo de vida de la planta con el fin de lograr realizar una mejor toma de decisiones por parte del agricultor. En la Figura 2 se muestra un esquema el cual resume el contexto anterior.

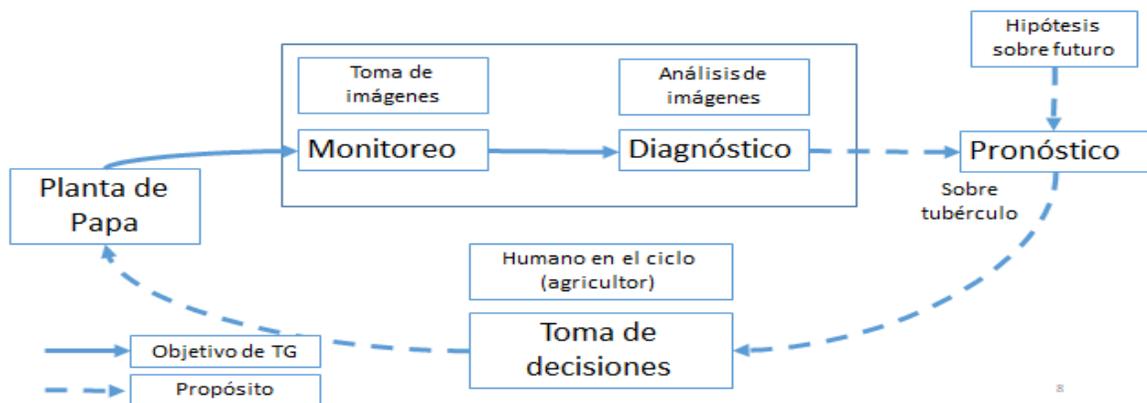


Figura 2. Del monitoreo a la toma de decisiones. El gráfico muestra las etapas del proceso en las cuales se centró la investigación. La prioridad fue el monitoreo y el diagnóstico por medio del análisis de imágenes. . Fuente: Esta investigación.

2.5 Formulación del problema

A partir de las situaciones problemáticas **P1**, **P2** y **P3** y teniendo en cuenta los supuestos **S1** y **S2** se define el problema de la investigación en forma de pregunta como:

¿Cómo realizar un análisis diagnóstico del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*Solanum tuberosum*) por medio de la medición no invasiva con instrumentación electrónica de indicadores fisiológicos de salud de la planta basados en análisis de imágenes?

2.6 Objetivos

2.6.1 Objetivo General.

Realizar un análisis diagnóstico del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*Solanum tuberosum*) por medio de la medición no invasiva con instrumentación electrónica de indicadores fisiológicos de salud de la planta basados en análisis de imágenes.

2.6.2 Objetivos Específicos.

- Definir los índices fisiológicos relevantes para ser monitoreados electrónicamente para el diagnóstico del estado de salud de las plantas de papa (*solanum tuberosum*).
- Diseñar un sistema de monitoreo electrónico basado en imágenes para el diagnóstico del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*solanum tuberosum*).
- Implementar el diseño del sistema de monitoreo electrónico basado en imágenes para el diagnóstico de los estados fisiológicos de salud de las plantas de papa (*solanum tuberosum*).
- Comparar la relación entre el estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*solanum tuberosum*) mediante la observación por parte del humano y el monitoreo sistematizado de los indicadores fisiológicos de salud.

2.7 Justificación

El Pronóstico y Gestión del Estado de Salud, PHM (Por sus siglas en inglés), es un área que se encarga del monitoreo de los sistemas dinámicos con el fin de ejecutar pronósticos sobre el desempeño futuro de los mismos, así como la gestión de la fiabilidad de los sistemas en el

tiempo (Sandborn & Wilkinson, 2007). El diagnóstico y pronóstico de los sistemas se realiza por medio de la información proveniente del monitoreo del sistema, principalmente de los indicadores de salud. Hoy en día, la instrumentación electrónica permite la implementación de sistemas de medición y/o estimación de variables diversas sobre los sistemas (Cooper & Helfrick, 2015).

En la actualidad un tema importante es la seguridad alimentaria, y en efecto el perfeccionamiento de los procesos de agricultura que hacen parte de los objetivos principales de desarrollo a nivel mundial (FAO, 2020). Por lo tanto, este contexto se sustenta aún más con las actuales condiciones de recesión mundial y la oportunidad de los procesos de producción locales. El propósito principal es contribuir potencialmente a la mejor administración de los recursos hídricos, y también de insumos agrícolas evitando al máximo su desperdicio.

Este proyecto se desarrolló alrededor del estudio científico e ingenieril, del monitoreo de la planta de papa (*Solanum tuberosum*). Con esta investigación se hace un aporte a la ciencia de ingeniería, ya que con este sistema de monitoreo electrónico se busca tener más precisión en el estado de salud que presenta la planta el cual está orientado al pronóstico con el fin de tener una menor tasa de error con respecto al análisis por parte del humano.

La papa se constituye en un producto imprescindible en la dieta de distintas familias alrededor del mundo como por ejemplo Alemania, Francia, España, Bolivia, Perú, Ecuador, etc. Ya que este producto es de mucho interés, es un producto necesario, rica en carbohidratos, es una buena fuente en calorías y algunos micronutrientes (FAO, 2008). Este proyecto de investigación estaría acorde a ese contexto internacional ya que podrían apoyarse de los avances que se obtengan. De esta manera podrían aplicar un sistema similar en otros tipos de planta agrícola teniendo en cuenta los parámetros de ésta.

En Colombia la papa es un producto indispensable en cada comida. Por ello, y otros factores, es considerada como uno de los tesoros alimenticios que proporciona el campo nacional (Garces, 1948). Actualmente, se hace necesario que el país aumente la tecnología aplicada al campo agrario, con esta investigación se busca que los agricultores de papa obtengan un monitoreo y diagnóstico para una menor tasa de error a la hora de hacer el pronóstico del estado de salud de la planta.

A nivel local, Nariño tiene buenas condiciones climatológicas, de relieve y de calidad de suelo. Esto hace que se den distintas condiciones favorables para el cultivo de papa, ya que según

el medio de información proveniente de Fedepapa (Federación Colombiana de productores de papa), del 96% de la producción total nacional, Nariño contribuye con el 20% de este producto (Fedepapa, 2018). Con el contexto anterior se espera hacer un aporte a los agricultores de la región, con el fin de que a futuro puedan mejorar la productividad y la calidad del producto.

A nivel institucional, se haría un aporte a la institución con respecto al campo de investigación ya que no se ha realizado aún proyectos con respecto al monitoreo y diagnóstico orientado a los pronósticos del estado de salud de la planta de papa. Esto puede abrir la puerta para seguir trabajando en esta línea a futuro.

2.8 Delimitación

Esta investigación se centra en las ventajas del monitoreo y diagnóstico previo como se muestra en la Figura 1, en la cual se muestra hasta donde llega el objetivo y a partir de dónde se considera propósito. Se realizó la prueba a una muestra de plantas a campo abierto durante el proceso de crecimiento para un cultivo tradicional en el municipio de Túquerres la obtención de datos se realizó por medio de un dispositivo prototipo. Las conclusiones obtenidas se consideran aptas para las condiciones descritas. Se pretende proveer las bases para genera una herramienta para realizar pronósticos sobre el estado de salud futuro de la planta de papa. La evaluación del impacto de la implementación del monitoreo electrónico para el mejoramiento del diagnóstico orientado al pronóstico de los estados fisiológicos de salud de las plantas de papa podría plantearse como un enfoque complementario para futuras investigaciones.

3. Marco teórico – contextual

3.1 Contexto

La investigación fue realizada en la Universidad CESMAG de la Ciudad de San Juan de Pasto, Nariño, Colombia, como proyecto de trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico. La Universidad CESMAG es una universidad de inspiración católica, de carácter privado, orientada por los principios franciscano-capuchinos y la filosofía personalizante y humanizadora de su fundador, padre Guillermo de Castellana; que dentro su misión promueve la formación integral y el bienestar de personas con espíritu crítico, ético y reflexivo, capaces de comprender y contribuir a la solución de problemas, desde su campo de acción, disciplinar e interdisciplinariamente.

El trabajo de campo de la investigación se realizó en el municipio de Túquerres, corregimiento de Santander en el departamento de Nariño, en un cultivo de papa cuya ubicación geográfica se muestra en la Figura 3, durante la temporada del año 2021. El cultivo se encuentra en una finca de propiedad familiar de uno de los autores. Cabe resaltar que el municipio de Túquerres y en general el departamento de Nariño, se constituyen en un sector de desarrollo principalmente agrícola y comercial, siendo el cultivo de papa una de las principales líneas productivas. Generalmente los pequeños y medianos productores se constituyen mediante asociaciones o como empresas familiares, como es el caso de la finca en cuestión.



Figura 3. Ubicación geográfica del cultivo donde se aplicó el monitoreo y diagnóstico a las plantas de papa. Fuente: Esta investigación.

En la Figura 4 se muestra el cultivo para el cual se eligió un número determinado de plantas individualizadas para toma de datos, experimentación y aplicación del sistema objeto de este trabajo. En complemento, se realizó el análisis de datos y diagnóstico tubérculo-planta, resultados que son mostrados en lo que sigue de este documento.



Figura 4. Cultivo de papa donde se desarrolló la investigación y se aplicó el sistema. Fuente: Esta investigación.

3.2 Antecedentes

3.2.1 Características de la planta de papa (*solanum tuberosum*).

Según (Bioenciclopedia, 2015) la planta de papa se conforma de tallos que pueden llegar a medir entre los 60 cm y 1 m de altura también de hojas compuestas organizadas entre 3 y 5 pares de folíolos. El tubérculo comestible se almacena subterráneamente donde almacena todo tipo de nutrientes, las flores en la planta son estructuras pequeñas de unos 2,5 cm de diámetro cuyos colores de sus pétalos varían de tonalidad blanca, amarilla, azul, rosada, roja y púrpura dependiendo del estado en que se encuentre el tubérculo.

3.2.2 Determinación fotogramétrica del área foliar de la planta de papa (*solanum tuberosum*).

Ha sido históricamente difícil técnicamente realizar mediciones directas a la planta de papa de su Índice de Área Foliar (IAF). Las hojas son en especial intermitentes y por lo tanto su

área requiere de un proceso escrupuloso. Además, es normal que se susciten cultivos dispares. Por ese motivo se propone la búsqueda y procedimiento de cuantificación del área foliar que permita el análisis de muestras representativas, efectuar un proceso inmediato y poseer practicidad operativa (Ovando, 2018).

El método de la determinación fotogramétrica digital del área foliar, manejará una de las variables de la presente investigación. Para ellos, se manejó instrumentos electrónicos como cámaras, asumidas estas como sensores pre-acondicionados para la tarea. El análisis del área foliar, se realizará mediante la cuantificación y evaluación de los datos mediante un software adaptado para este fin (Matlab).

3.2.3 Método cuantitativo para medir el área foliar de la planta de papa (*solanum tuberosum*) a través de imágenes digitales.

Es un trabajo que involucra un nuevo método de evaluación del nivel de daño provocado por larvas de polillas de la papa. El método se basa en el análisis de imágenes, mediante la utilización de herramientas tecnológicas con un software como: Gimp 2.6.4 (programa de manipulación de imágenes GNU), se encontró que es un método particularmente confiable para medir los niveles de daño intermedios que son difíciles de estimar de manera visual (Carpio et al., 2010).

Se ha determinado que para la presente investigación el uso de esta metodología sería un soporte acorde de apoyo para realizarlo, ya que se pueden obtener datos objetivos en cuanto a la cuantificación del área foliar de la planta de papa, además, de poder diagnosticar indirectamente su estado de salud. Todo esto debido a que no están sujetos a interpretaciones humanas, mejorando inherentemente su precisión y exactitud.

3.2.4 Diagnóstico del estado de salud en los cultivos.

El objetivo del trabajo de (Gutiérrez-Soto & Cadet-Piedra, 2011) es proveer conocimientos básicos y los principios técnicos necesarios, y un uso correcto de sensores remotos o dispositivos electrónicos aplicados a plantas agrícolas, en el marco de la denominada agricultura de precisión. Se sustenta que se debe utilizar instrumentos de bases físicas y fisiológicas que respaldan su uso en la agricultura, además, de las propiedades radiactivas de las superficies vegetales y también

los cambios foliares que presente la planta. La información obtenida es clave para determinar el estado de salud de una planta o cultivo en forma objetiva.

La presente investigación está centrada en el monitoreo y diagnóstico de la planta de papa tomando como variables el análisis foliar e índice de verdor, todo esto va orientado a realizar investigaciones futuras sobre un pronóstico del tiempo de vida de la planta. Se logró obtener la información, por medio de cámaras digitales. Como resultado de esta etapa se realizó el análisis de imágenes digitales mediante un software de Matlab, donde se pudo visualizar el estado en el que se encuentra de acuerdo con los indicadores fisiológicos que presente. Se tomó el apoyo del trabajo de diagnóstico del estado de salud, teniendo como finalidad el resultado del comportamiento del sistema que se aplicará utilizando los sensores o dispositivos electrónicos, con el fin de buscar una correlación con las variables obtenidas de las imágenes de las hojas y los tubérculos obtenidos.

3.2.5 Monitoreo asistido de plantaciones agrícolas.

En el instituto tecnológico de Costa Rica se inició un proyecto de investigación que contempla las pruebas agronómicas y el sistema de desarrollo computacional para el proceso de información en la producción y control de la mancha de la hoja causada por la sigatoka (Vargas Jarquín, 2008). En este trabajo se considera que la sigatoka negra o mancha de la hoja es la mayor limitación que enfrenta la producción agrícola. Este trabajo utiliza técnicas de procesamiento digital de imágenes e inteligencia artificial para diagnosticar y controlar la incidencia de la sigatoka negra.

Se utilizó como referencia en la presente investigación ya que realiza un monitoreo de una variable importante que en el presente proyecto está definida como índice de verdor. Además, en esta investigación se busca realizar ese procesamiento digital de imágenes teniendo en cuenta esta variable y buscar dar una respuesta sobre cómo es su comportamiento mediante el sistema de monitoreo y diagnóstico del índice de verdor que indirectamente se relaciona con su estado de salud.

3.2.6 Sistema de monitoreo de parámetros agrícolas para la supervisión de cultivos de manera remota basado en redes de sensores inalámbricos.

El trabajo de (Guillen, 2012) consiste en el desarrollo e implementación de un prototipo electrónico para el monitoreo de los siguientes parámetros ambientales: altitud, precisión, temperatura ambiente, temperatura de suelo, luminosidad, humedad de ambiente y suelo, y humedad en las hojas. Los datos son visualizados y analizados por medio del internet de las cosas (IOT) y redes inalámbricas de sensores.

Se considera un antecedente interesante dado que el punto común con la presente investigación es que los dos trabajos estarían basados en la supervisión de la planta de papa, como también el similar manejo de algunas variables. Además, en la presente investigación, el sistema de monitoreo se basa en el análisis de imágenes digitales por medio de cámaras, algo un poco distinto a lo presentado en el contexto anterior. También esta investigación utilizará del trabajo de (Guillen, 2012) algunos conceptos sobre la supervisión y manejo del sistema.

3.2.7 Determinación del área foliar en fotografías tomadas con cámaras digitales.

Las determinaciones del área foliar son muy usadas en investigación agrícola, para su cuantificación existen equipos automáticos, donde se acopla el uso de las cámaras digitales (cámaras semiprofesionales) y un software libre para el análisis de imagen, con el fin de determinar el área foliar simple y precisa (Guerrero et al., 2012).

3.2.8 Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda sobre cuatro variedades de papa (*solanum tuberosum*).

En (Santos, 2010) el análisis de crecimiento se realizó en las variedades pastusa, única, suprema, betina, esmeralda y diacol capiro, con el objetivo de comparar el crecimiento y relación fuente-demanda de estos cultivares durante su ciclo de cultivo. Se evaluaron las variables de área foliar, materia seca y se obtuvieron los índices de crecimiento. Estas variedades se evaluaron en cuanto a la Relación de Área Foliar (RAF), a su Duración de Área Foliar (DAF), y los Índices de Área Foliar (IAF). Con estas variables evaluaron el proceso de crecimiento de estas variedades de papa.

Fue de gran utilidad para la presente investigación ya que contiene gran parte de información y automatización para su desarrollo. En forma similar, en la presente investigación

el instrumento electrónico se realizó con una cámara de celular móvil o web, suficiente para realizar el sistema de monitoreo y diagnóstico. Este sistema fue el encargado de estimar los indicadores fisiológicos de salud que presente la planta de papa.

El contexto anterior está relacionado con análisis de crecimiento de diferentes variedades de papa, en el cual su factor de evaluación es su (RAF), su (DAF) y su (IAF). Para la presente investigación es de vital importancia en cuanto a la información que ésta contiene con respecto a las variables que evalúan que son: relación área foliar, duración área foliar e índice de área foliar. Estos datos serán utilizados como referencia para la implementación del sistema de monitoreo y diagnóstico que a diferencia de la anterior investigación que se evalúa este análisis de crecimiento de forma manual. Esto, teniendo en cuenta que uno de los propósitos de esta investigación es la orientación hacia una herramienta de ayuda para la toma de decisiones del agricultor.

3.2.9 Características biométricas de un cultivo de papa.

En (Ramírez 2019), se estudia el estado de salud de la planta a partir la relación entre su vigor y la presencia de zinc. El zinc es uno de los elementos esenciales que requiere la planta, el cual está presente en la biosíntesis del Ácido Indol acético importante en la expansión foliar y crecimiento de las zonas meristemáticas. Una de las maneras de proveer de este nutriente a las plantas y así optimizar la capacidad productiva de los cultivos es la fertilización, la cual puede darse vía edáfica o foliar.

Esta información se utiliza para la presente investigación, en cuanto al análisis que se hará mediante imágenes digitales, donde se podrá extraer características biométricas apoyadas de la anterior información, que se aplicará mediante su análisis foliar. De esta forma, se podrá medir variables como altura de la planta (cm), área de la hoja (cm), perímetro (cm), densidad de color (%). El contexto anterior se aplica como una base de soporte para la implementación del sistema de monitoreo electrónico.

3.2.10 Determinación del área foliar en papa (*solanum tuberosum*) por medio de fotografías digitales con relación al número de píxeles y altura de adquisición.

Las mediciones directas del Índice de Área foliar (IAF) han sido históricamente difíciles de realizar en papa. Las hojas son particularmente irregulares y por lo tanto la estimación de su área

foliar requiere de un procedimiento meticuloso. Además, es común que se susciten cultivos dispares; razón por la cual es necesario trabajar con gran variedad de herramientas tecnológicas y realizar un procedimiento de cuantificación del área foliar (Rodríguez et al., 2000). En este trabajo se reúnen características como: permitir el análisis de muestras representativas, efectuar un procesamiento inmediato y poseer practicidad operativa. Se detallan las variables operativas para la determinación fotogramétrica del área foliar, que se presenta como tratamiento de las imágenes por medio de un software de clasificación.

De este antecedente se utilizó en la presente investigación la determinación fotogramétrica digital del área foliar, que permitirá el tratamiento de las imágenes por medio de un software de clasificación. La presente investigación mejora con respecto al antecedente, en que el estudio de esta no solo será su área foliar sino a partir de esta y otros parámetros auxiliares se realizará un diagnóstico sobre su estado de salud mediante el monitoreo electrónico.

3.2.11 Medición automática del área de afectación por sigatoka negra en imágenes de la hoja de plátano.

Según (Pinto & Juez, 2017) la sigatoka negra, es una fitopatología por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, que reduce la producción de plátano y banano. Actualmente los métodos de detección en Colombia se basan en análisis visual sobre la plantación y para establecer la relación porcentual del área afectada se usa la escala de Stover. En este trabajo se tuvo en cuenta comparar los dos métodos de medición de la sigatoka negra en hojas de plátano. El primero fue el cálculo manual, el cual permite establecer el porcentaje de una plantación según la escala de Stover modificada por Gaulh y el segundo, mediante un algoritmo computacional, el cual determinó el área de afección de la enfermedad de forma automática. Como resultado el algoritmo computacional ofrece una alternativa confiable y de mayor precisión en la identificación de la fitopatología, lo que facilita un diagnóstico temprano.

Se utilizó y sirvió como una herramienta de vital importancia el antecedente anterior, ya que aplica una técnica similar a la que se utilizará en la presente investigación, la cual es el análisis de imágenes digitales, en este caso para poder diagnosticar el estado de salud de la planta de papa (*solanum tuberosum*) a partir de los indicadores fisiológicos externos. Por ende también se realiza una comparación frente al tubérculo obtenido realizando comparaciones con las variables medidas.

3.2.12 Un método cuantitativo para medir el área del tubérculo dañado por larvas de *Tecia solanivora* (Lep.; Gelechiidae) a través de análisis de imágenes digitales.

Se desarrolló un nuevo método de evaluación del nivel de daño provocado a los tubérculos por las larvas de polillas de la papa. El método se basa en el análisis de imágenes digitales. El complejo de las polillas de la papa, *Phthorimaea operculella* (Zeller), *Tecia solanivora* (Polvony) y *Symmetrischema tangolias* (Gyen, 1913) (Lepidoptera: Gelechiidae), es uno de los grupos de plagas que causa mayor daño a este cultivo, tanto en campo como en almacenamiento.

La larva se alimenta inicialmente encima de la piel del tubérculo, para luego perforar más profundamente y formar galerías sinuosas. La estimación visual del daño causado por las plagas ha sido uno de los métodos utilizados desde hace mucho tiempo atrás para el manejo y control de estos insectos.

3.3 Enunciados de los supuestos teóricos.

3.3.1 Tubérculo de la papa.

Es de origen andino, extraída de la planta herbácea americana (*solanum tuberosum*) originaria en Suramérica. Es cultivada por todo el mundo, ya que su tubérculo es comestible (Carranza, 2017). Considerado como un producto indispensable en la canasta familiar o dieta de algunas familias, además, es un producto necesario, rica en carbohidratos, es una buena fuente en calorías y algunos micronutrientes.

Para el desarrollo de esta investigación interesa saber su parte de morfología y anatomía, gran parte de esta investigación consiste en sus análisis foliar e índice de verdor.

Desglosando estas variables mencionadas se trabajó con la hoja: que son compuestas y consisten de un peciolo con foliolo terminal, foliolos laterales secundarios. La flor consta de colores diversos, estilo, estigma y su ovario biocular. Y el tallo puede ser ramificado y es generalmente hueco y triangular en sección transversal, tiene alas rectas u onduladas la parte basal es redonda y sólida. De gran parte de esta información se extrajeron las variables a medir con el sistema de monitoreo.

3.3.2 Diagnóstico no invasivo.

Para el desarrollo de este proyecto se aplicó una medición indirecta no invasiva hacia la planta de papa, sin afectar el tubérculo de la planta que es la parte de interés comercial. Esto se realizó, basándose exclusivamente en su análisis foliar e índice de verdor por medio de análisis de imágenes y unas variables de soporte como un control de humedad y temperatura. Por lo tanto, estos datos recolectados a partir de ese diagnóstico no invasivo (Howeler, 1983), implica menor o nulo peligro para el tubérculo de papa como el elemento analizado.

3.3.3 Indicadores fisiológicos externos.

El desarrollo de esta investigación tuvo como objetivo realizar el monitoreo de la planta de papa para dar un diagnóstico sobre su estado de salud a partir de los indicadores fisiológicos externos que presenta la planta durante todo su proceso de crecimiento (Santos, 2010). Los indicadores pueden estar basados en sus hojas y su superficie foliar a partir de las medidas lineales (largo y ancho), y en su índice de verdor (cambios físico-químicos en su color y deformación).

Teniendo en cuenta las variables mencionadas se ejecutó el sistema de monitoreo a partir de imágenes digitales y se obtuvo un análisis con la ayuda de un software de Matlab, y finalmente poder dar un diagnóstico a partir de una cuantificación de los datos obtenidos (toma de imágenes y tubérculos) por medio de una correlación sobre el estado de salud de la planta de papa a partir de los indicadores fisiológicos externos.

3.3.4 Análisis de imágenes por medio de algoritmos computacionales

Actualmente en Colombia los métodos de detección del comportamiento del área foliar y su índice de verdor se basan en análisis visual por parte del humano (Pinto & Juez, 2017).

La presente investigación tiene como objetivo principal realizar el sistema de monitoreo y diagnóstico no invasivo de la planta de papa por medio de imágenes digitales, que después serán procesadas por medio de un algoritmo computacional, con el fin de diagnosticar su estado de salud de acuerdo con sus indicadores fisiológicos de salud a partir de probabilidades y correlación en cuanto a la caracterización de las variables medidas tanto de las hojas como del tubérculo obtenido. Todo esto se pudo realizar usando la herramientas de procesamiento de

imágenes para ejecutar el análisis foliar, basándose en su umbral de color, porcentaje de área necrótica del tejido y a sus cambios físicos.

3.4 Definición de conceptos.

3.4.1 Variable.

Indicadores fisiológicos externos: Análisis foliar (área, perímetro, ancho, largo) e índice de verdor (densidad de color), cuantificación de los tubérculos (peso, volumen, densidad, largo y ancho).

3.4.2 Cómo se define con el contexto.

Análisis foliar (comportamiento de la hoja, tallo y flor) e índice de verdor (cambios de coloración en la hoja): implementar una medición directa a estos parámetros ha resultado muy difícil de realizar en la planta de papa, ya que el desarrollo de su área foliar (hojas) es intermitente y por tanto la estimación de su área requiere de un seguimiento meticuloso. Para esta investigación se realizará una cuantificación de esta variable, partiendo de parámetros que permitirá medir variables como altura de la planta (cm), perímetro y área de la hoja (cm), densidad de color (%), número de tallos, tallos principales, concentración en hojas y rendimiento en cuanto a sus cambios físico-químicos que presente durante su desarrollo de crecimiento.

3.4.3 Cómo se mide.

Se midió a partir de la cuantificación que se realizó a su análisis foliar mediante un procedimiento de fotogrametría digital, que permitió el tratamiento de imágenes digitales mediante software de clasificación (desarrollado en la plataforma Matlab). A partir de esta medición se pudo hacer una evaluación de acuerdo a las variables de estudio, como también se midió y caracterizo los tubérculos de cada planta seleccionada para realizar la investigación, clasificando cada una de las variables obtenidas en una base de datos y poder dar el diagnóstico sobre estado de salud de la planta de papa a partir de la comparación entre estas dos variables de estudio las hojas y los tubérculos.

3.5 Hipótesis.

El Análisis de imágenes del área foliar de la planta de papa (*Solanum tuberosum*) mediante el estudio de la fisiología y la medición de indicadores de salud u otros parámetros auxiliares del crecimiento de hojas, permitirá monitorear y diagnosticar en forma no invasiva características del tubérculo de la planta.

4. Metodología

4.1 Enfoque

Dentro del están relacionados con el enfoque cuantitativo, con datos cuantitativos o cuantificables, lo cual conlleva a obtener propiedades, características que posee el objeto de estudio. El trabajo se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, en el que las variables que alimentan el sistema son de forma numérica, como lo son el análisis foliar e índice de verdor, a partir de todos los cambios físico-químicos que presente durante su etapa crecimiento.

4.2 Paradigma

La investigación se encuentra dentro del neopositivismo o positivismo lógico, que centra la generación de conocimiento en elementos verificables obtenidos por la Unión de las corrientes filosóficas racionalistas y empiristas. En donde los resultados generados en el proceso investigativo, se deducen teóricamente y se comprueban en la práctica. En este trabajo el modelo a desarrollar se basa en la información que se suministra a partir de mediciones indirectas hacia la planta de papa sin afectar su tubérculo, establecidas por variables como índice de verdor y análisis foliar, que se contrastan con la validación del modelo.

4.3 Método

Debido a las características neopositivistas y cuantitativas del trabajo el método que se utiliza es el método científico entendido como una serie de pasos que involucran el método deductivo e inductivo para formular una hipótesis y contrastarla con la experimentación esto con lleva al desarrollo de un modelo confiable repetible válido y objetivo, replicable y aplicable a diferentes plantas de papa.

4.4 Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo descriptiva, pues la finalidad es el monitoreo y diagnóstico de las variables más adecuadas para aplicar a un sistema de pronóstico de tiempo de vida de plantas de papa, teniendo en cuenta el índice de verdor de hojas de la planta y dimensiones de hojas tallo, raíces y otras variables como temperatura y humedad, ya que éstas afectan directamente al

estado de salud de la planta. Todo esto para alcanzar variables óptimas orientadas a un pronóstico del tiempo de vida de la planta de papa, realizando una relación entre las variables obtenidas con el sistema de monitoreo y diagnóstico y variables reales. Con el fin de determinar las variables del objetivo de investigación que son los diferentes indicadores fisiológicos de la planta.

4.5 Diseño de investigación

La metodología utilizada para la toma de datos se realizó en primera instancia con el seleccionamiento de 10 plantas, posteriormente se realiza una enmarcación o señalización de las 5 hojas por planta. Como segundo paso; se realizó la toma de datos por medio de toma de imágenes mediante una cámara de teléfono móvil a una altura no mayor a 5 cm de la hoja a medir, cubriendo con un dispositivo básico que consiste en cubrir la hoja con dos placas de acrílico para obtener una buena medición. En el cultivo se seleccionaron 10 plantas para la recolección de datos de medida. Y de cada planta se escogió 5 hojas por planta. El tiempo de muestreo que se estableció fue de 7 días. Posteriormente se realizó un dispositivo básico que consiste en dos placas de acrílico los cuales cubrirán la hoja para realizar una buena toma. Las hojas a medir están enmarcadas con hilos de colores (amarillo, rojo, azul, verde y rosado). El análisis del estado de salud de las plantas se realizó teniendo en cuenta datos de imágenes de las hojas, orientado un análisis foliar. En principio se tomó imágenes en un análisis longitudinal. Esto se hace con el objetivo de entrenamiento de unos algoritmos de análisis. Los parámetros para análisis foliar fueron su superficie foliar, área, perímetro e irregularidades de color, posteriormente a la obtención de los tubérculos se realizó una caracterización a cada tubérculo obteniendo una base de datos de su peso, longitud, volumen y densidad. Una vez obtenido estos datos se realizó mediante el software de matlab una depuración de datos para tener valores promedios de cada una de las variables y así mediante el toolbox de curve fitting se realizó el análisis de correlación Hojas – Tubérculos, obteniendo en todas las combinaciones posibles resultados con buen grado de correlación y finalmente obtener un modelo de predicción de estado del tubérculo. El contexto anterior es representado en el siguiente diagrama en la Figura 5

El diseño para la investigación fue de tipo experimental puro que asegura control y validez interna, donde va a tener varios grupos de comparación de forma aleatoria. Se midieron variables como: análisis foliar e índice de verdor de la planta de papa, donde el tratamiento experimental será el sistema de tratamiento de enfermedades utilizando imágenes digitales, aplicado a un número determinado de plantas. La investigación está orientada al desarrollo de una o varias ayudas tecnológicas que ayuden al agricultor.

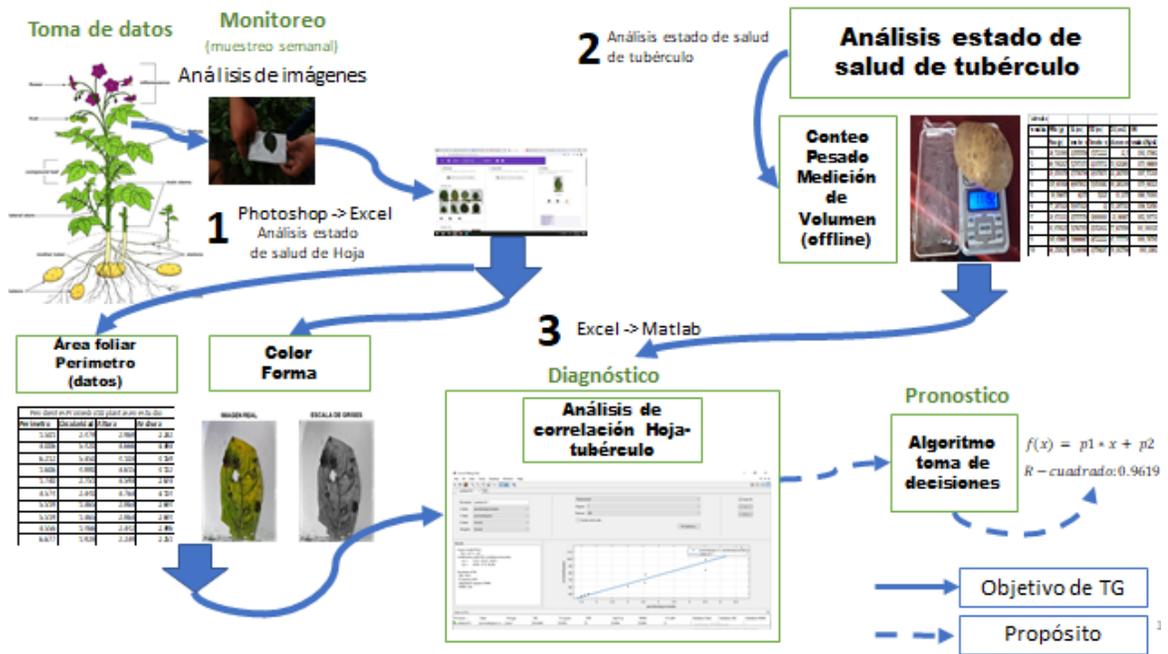


Figura 5. Diagrama metodología realizada. Se presenta de forma minuciosa un esquema de todo el desarrollo de los objetivos específicos

4.6 Universo

Dado que esta investigación es de tipo exploratorio en cuanto a los datos tomados, el universo se constituye como el número de plantas total del cultivo de papa en lote seleccionado para el experimento. Las conclusiones que se obtengan serían válidas entonces para las características del cultivo descritas en el documento. El lote de siembra tenía aproximadamente 16.000 plantas, con separación de surcos de aproximadamente 1m y de distancia entre plantas de 0.3m.

4.7 Muestra

Corresponde a un número de diez (10) plantas, de un sector del cultivo, sobre las cuales se tomará los datos en forma lo suficientemente representativa del cultivo. Se aclara que se escoge este número en forma arbitraria, teniendo en cuenta que son plantas que quedan en surco accesible para la toma de datos y de un sector que garantizaba pocos daños por acceso del agricultor o maquinaria. La muestra no se calcula entonces con representatividad estadística si no práctica. Este número de plantas se considera lo suficientemente útil para tomar imágenes y verificar un comportamiento promedio en los datos.

4.8 Técnicas de recolección de información

Observación directa: la información que se necesita se obtiene a partir del diseño de sistema de monitoreo y diagnóstico, que funciona mediante la toma de imágenes a la planta de papa. Una vez esté listo, las variables a analizar en principio serán el análisis foliar e índice de verdor como variables de entrada, ya que estas variables permitirán dar una orientación a realizar el pronóstico del tiempo de vida de la planta de papa, a partir de indicadores fisiológicos de salud.

La técnica que se utilizó, fue a partir de la de toma de imágenes, mediante una cámara de teléfono móvil a una altura no mayor a 5 cm de la hoja a medir, cubriendo con un dispositivo básico que consiste en cubrir la hoja con dos placas de acrílico para obtener una buena medición. En el cultivo se seleccionó 10 plantas para la recolección de datos de medida. Y de cada planta se tomó 5 hojas por planta. El tiempo de muestreo que determinamos es de 7 días, posteriormente se realizan las tomas de imágenes con el dispositivo prototipo básico descrito previamente con una distancia de 10 cm. Las hojas a medir están enmarcadas con hilos de colores (amarillo, rojo, azul, verde y rosado). El análisis del estado de salud de las plantas se realizará teniendo en cuenta datos de imágenes de las hojas, orientado un análisis foliar.

4.8.1 Validez técnica.

La técnica de recolección de información es válida dentro de las características experimentales descritas, porque el sistema de monitoreo y diagnóstico mediante análisis de imágenes permitirá trabajar con algoritmos con cierto grado de abstracción de los fenómenos

físico-químicos que estén involucrados en la planta (Santos, 2010). A partir del análisis de imágenes se logró hacer una caracterización y cuantificación de los datos obtenidos por las imágenes digitales de las hojas y también de los tubérculos obtenidos, partiendo a realizar una comparación entre estas dos variables de estudio.

4.8.2 Confiabilidad técnica.

La técnica es confiable dentro de las características experimentales descritas, debido a que permitirá medir las variables de análisis foliar e índice de verdor de la planta de papa, estas variables permitirán dar una orientación a realizar un pronóstico sobre el estado futuro de la planta, a partir del análisis de imágenes. Según la investigación de (Pinto & Juez, 2017) les permitió la identificación del estado de salud de la hoja del plátano, facilitándoles una detección de diagnóstico temprana.

La técnica que se va a utilizar es similar a la del contexto anterior; A partir de esto se podría cuantificar su área foliar y medir otros parámetros auxiliares, para diagnosticar el estado de salud de la planta de papa por medio de una correlación con las variables medidas tanto de las hojas como del tubérculo.

4.8.3 Instrumentos de recolección de información.

A través de la técnica de observación directa mediante la proyección en el tiempo real en pantalla de gráficas y tablas por medio de un computador, se realiza la medición de los valores sensados del estado de salud de la planta en intervalos de tiempos establecidos y tiempos de estabilización. En este proyecto, se planteó tomar las medidas mediante la utilización de sensores de imagen para análisis foliar. En este trabajo, esta metodología se considera una forma viable para estimar el estado de salud foliar, el cual se asumen como una medida indirecta del estado de salud general de la planta, incluido el tubérculo. De tal manera que al final, una vez caracterizado los datos tanto de las imágenes de las hojas como de los tubérculos, se realizó una comparación de las variables medidas y a partir de esa correlación se logró realizar un diagnóstico de las plantas con respecto al tubérculo. Este proceso, permite mejorar significativamente la toma de decisiones sobre administración de nutrientes y descarte temprano de plantas, por parte del agricultor y también motiva la realización de investigaciones futuras a realizar pronósticos sobre el tiempo de vida de la papa. En la Figura 6 se muestra el diseño realizado de la base de datos.

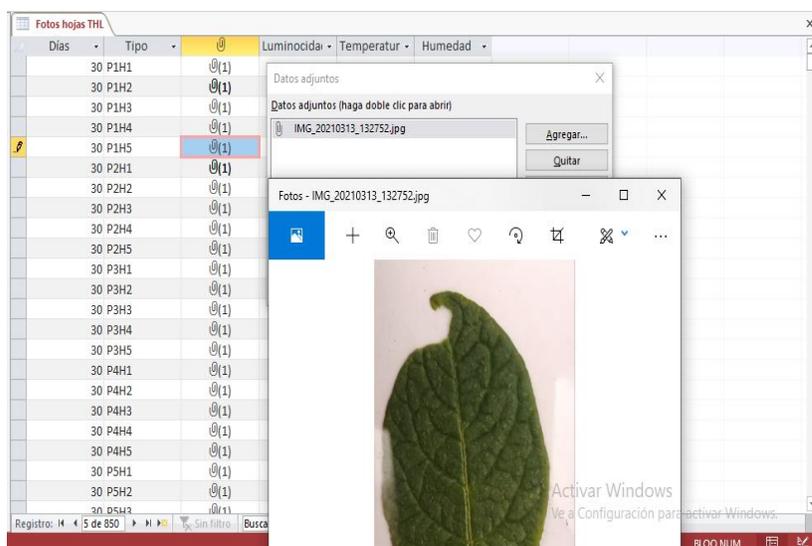


Figura 6. Base de datos de imágenes fotográficas. El gráfico muestra la base de datos creada para la recolección de las imágenes y posterior a esto realizar su respectivo análisis

4.9 Definición de los índices fisiológicos de la planta de papa (*solanum tuberosum*) relevantes para ser monitoreados electrónicamente.

En la Tabla 1 se muestra parámetros clave o a tener en cuenta para el desarrollo de la investigación.

4.9.1 Parámetros de medida e identificación del estado del tubérculo de la papa para la clasificación y entrenamiento de la red neuronal.

Tabla 1. Características y propiedades de la planta de papa de estudio. Tomada de papa en ecuador [tabla] www.cipotato.org

Variedad:	ICA Única
Características de la planta:	Porte alto, tallos vigorosos de color oscuro, follaje verde oscuro, folíolos primarios grandes, floración profusa de corta duración, flores de color lila.
Características de tubérculo:	Alto porcentaje de tubérculos de tamaño grande a muy grande, producción uniforme, forma redonda algo alargada, color de la piel crema-marrón con la yema de los ojos color rosado.

Reacción a enfermedades:	Alta resistencia a las razas predominantes de gota (phytophthora infestans) y a las polillas (Phthorimaea operculella (Zeller), Teciá solanivora).
Características agronómicas:	El rendimiento promedio de esta variedad, evaluado en alturas entre los 2.600 y 3.200 metros, se encuentra entre los 30 y 45 t/ha (toneladas por hectárea). El periodo vegetativo es de 150 a 165 días.

4.9.2 Superficie foliar.

Por medio de la imagen se puede calcular con precisión y exactitud considerable el área (m²) de cada hoja. Esto se hace para determinar tamaño y crecimiento. Por ejemplo se puede comparar tamaños de hojas intra-planta e inter-planta.

4.9.3 Color.

Se utiliza para ver el estado de oxigenación y nutrientes en general de las plantas. El color está también relacionado con la exposición a la luz solar.

4.9.4 Irregularidades de color.

Están relacionadas con Fitopatología. En este caso se hace relación a los cambios de color que presenta la hoja de la planta de papa ya que esta se encuentra en campo abierto sometida a cambios climáticos y fenómenos físico-químicos que presenta durante todo su proceso de crecimiento.

4.9.5 Irregularidades de borde (Morfología).

Están relacionadas con crecimiento, Fitopatología. Parte de la biología que trata de la forma y evolución de esta planta, siendo más específicos en la hoja que fue el objeto de estudio en donde normalmente poseen hojas imparipennadas, es decir tiene raquis central (eje principal sobre el que se insertan las flores, en las hojas simples) y varios folíolos.

5. Desarrollo Experimental

A continuación, se detalla el diseño experimental para abordar los objetivos propuestos. De igual forma, en paralelo se muestra el diseño del sistema de monitoreo electrónico basado en imágenes para el diagnóstico del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*solanum tuberosum*). De igual forma

5.1 Diseño de Experimento para la metodología utilizada para la toma de datos

Se realizó en primera instancia el selecciona miento de las 10 plantas, posteriormente se realiza una enmarcación o señalización de las 5 hojas por planta. Como segundo paso; se realizó la toma de datos por medio de la toma de imágenes por medio de una cámara de teléfono móvil a una altura no mayor a 5 cm de la hoja a medir, cubriendo con un dispositivo básico que consiste en cubrir la hoja con dos placas de acrílico para obtener una buena medición

Tabla 2. Determinación de número de plantas en estudio. . Fuente: Esta investigación.

Cuántas plantas:	10 plantas seleccionadas para la recolección de datos de medida.
Hojas:	5 hojas por planta.
Filas	1 “Guacho”
Tiempo de muestreo:	7 días

5.2 Diseño de estación meteorológica de soporte.

Teniendo en cuenta los cambios climáticos repentinos presentados en la zona del municipio de Túquerres ya que se encuentra a más de 2743 m.s.n.m. Se implementó una estación meteorológica solo para el cultivo de papa donde se realizó la investigación, ya que en ese sector en ocasiones se presentan bajas temperaturas inferiores a los 0 C° lo que casusa daño oxidativos en las hojas tanto como en el tallo de las plantas de papa. Por este motivo también se monitoreo temperatura, humedad, velocidad de viento todo esto con el fin de que estos datos sirvan de alguna ayuda o soporte de alguna ayuda para buscar también al final una correlación de si incide o no las variables meteorológicas obtenidas con los datos de las tomas de las imágenes. En la

Figura 9 se evidencia el funcionamiento de la estación meteorológica en el lugar donde se encontraba ubicado el cultivo de papa.

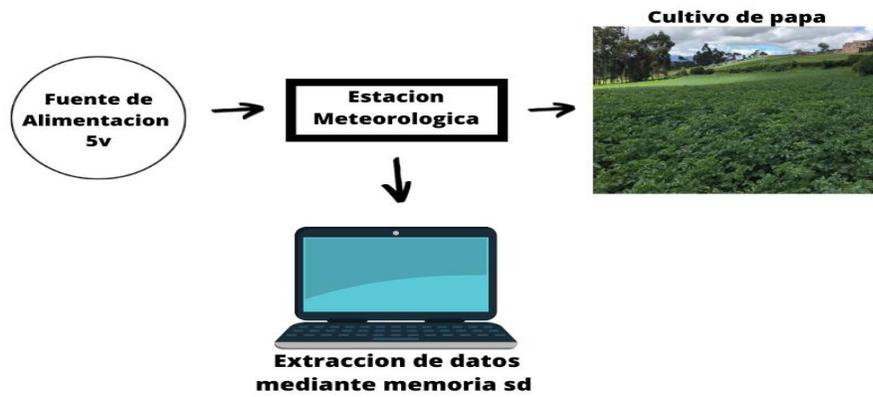


Figura 7. Diagrama de bloques. Estación meteorológica. . Fuente: Esta investigación.

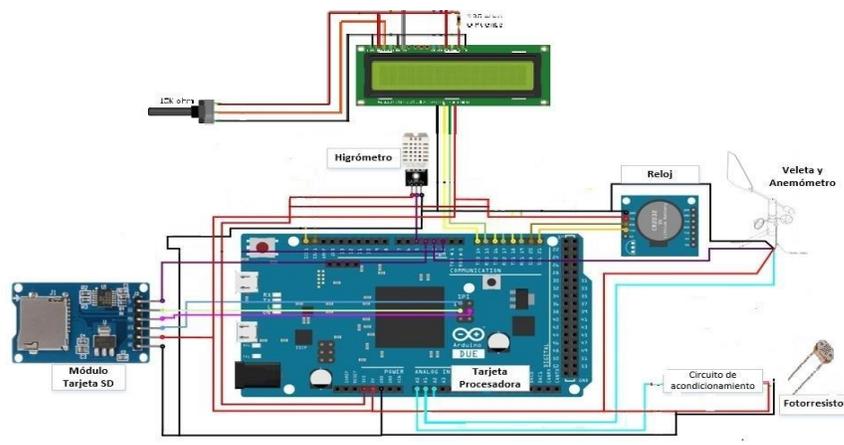


Figura 8. Plano esquemático. Estación meteorológica. En anexo se encuentra el plano completo. Fuente: Esta investigación.



Figura 9. Estación meteorológica de soporte. Se muestra la estación meteorológica en campo

5.3 Diseño dispositivo prototipo para la toma de datos.

Se realizó un dispositivo básico que consiste en un cilindro de acrílico donde el teléfono móvil a utilizar siempre estará a una misma distancia, el dispositivo al fondo tiene dos placas de acrílico los cuales cubrirán la hoja para realizar una buena toma, para que todas las hojas estén a iguales condiciones el dispositivo es el que se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Dispositivos para la toma de datos. Muestra el dispositivo listo para ser usado en la toma de datos.

5.4 Sistema de diagnóstico

Se implementó el diseño del sistema de monitoreo electrónico basado en imágenes para el diagnóstico de los estados fisiológicos de salud de las plantas de papa (*solanum tuberosum*).

Las hojas a medir están enmarcadas con hilos de colores (amarillo, rojo, azul, verde y rosado) como se puede apreciar en la Figura 11.



Figura 11. Toma de datos. Muestra el dispositivo en la toma de datos registrando una hoja

5.5 Diseño base de datos.

La recolección de datos se realizó de forma manual por conveniencia ya que la prioridad es entrenar el algoritmo de análisis de datos y tener datos longitudinales. Los datos a obtener son imágenes tipo JPG que para nuestro trabajo es práctico y suficiente. Imágenes que son un tipo de archivo pixelado, relativamente pequeñas, suficientes para determinación de color con escala por ejemplo RGB y para la determinación de tamaño de borde para la determinación de su área en cm^2 .

El Instrumento que se utilizó es una cámara de teléfono móvil que para nuestro trabajo es asequible, práctico y suficiente. Las características del teléfono con que fueron tomados los datos, es un teléfono Huawei p30 lite con una cámara con características de 24MP 1:1.8/27 ASPH

Cada foto tendrá su etiqueta correspondiente con el día en que fue tomada. Y la etiqueta que se utilizará para las fotos es:

Pn: donde P es la planta y n es el número de la planta a la cual se le va a realizar la

Hn: donde H es la hoja y n es el número de hoja a la que se está tomando la foto

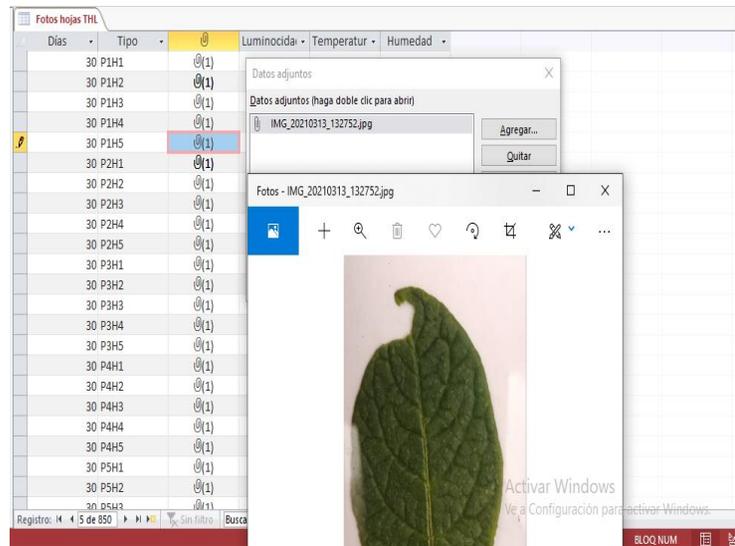


Figura 12. Diseño de base de datos. Se muestra el diseño de la construcción de la base de datos

5.6 Caracterización de imágenes obtenidas a partir de la base de datos de las hojas durante el proceso de evolución de cada una de ellas.

Se realizó mediante el software Adobe Photoshop una cuantificación de todas las imágenes obtenidas en el transcurso de la toma de datos, el cual nos permitió realizar una conversión de pixeles a cm² permitiendo calcular variables numéricas como es su área, perímetro, circularidad, altura, anchura, densidad integrada. Como se muestra en la Figura 13. Cabe resaltar que el análisis preliminar se realiza mediante Adobe PhotShop dado a que permite a la vez editar y componer imágenes rasterizadas soportando varios modelos de colores (RGB, CMYK, CIELAB, colores sólidos y semitonos), y que a su vez permite un funcionamiento óptimo y ágil a la hora de realizar la cuantificación con todas las hojas. De igual forma se resalta que para tareas de clasificación automáticas, Matlab ofrece un entorno que también permite el manejo de datos desde una perspectiva analítica.

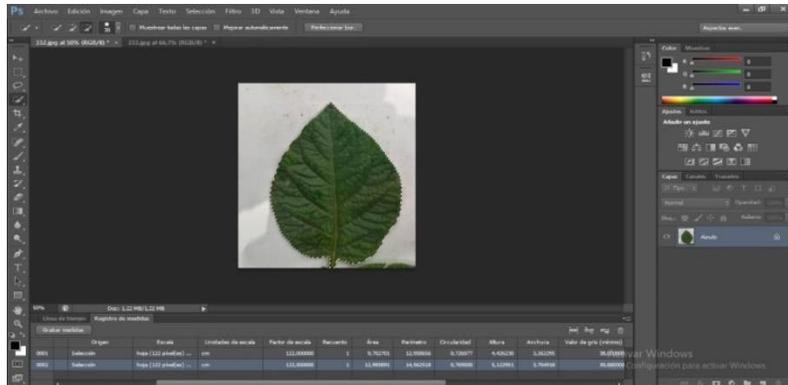


Figura 13. Caracterización de imágenes. El gráfico muestra la caracterización de imágenes a partir del software Adobe Photoshop

5.7 Corroboración de los datos cuantificados a partir de la toma de imágenes utilizando el software Matlab

Método utilizado para corroborar y mostrar veracidad en los datos obtenidos anteriormente en el software de Adobe Photoshop, como se muestra en la Figura 14

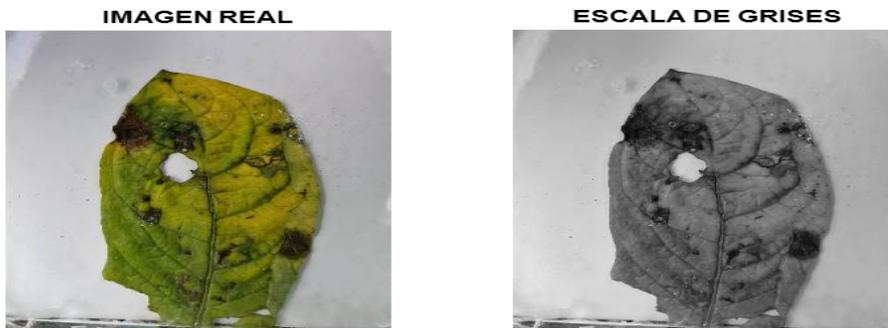


Figura 14. Caracterización de imágenes. El gráfico muestra la caracterización de imágenes a partir del software Matlab.

5.8 Construcción de los datos obtenidos a partir de la cuantificación de las imágenes.

Se realizó una base de datos que permitió trabajar más cómodamente con los datos a la hora de extraer los datos y realizar el estudio correspondiente, en la cual se obtuvo variables como. Área, Perímetro, Circularidad, Altura, Anchura, Densidad de color y estado de la hoja.

5.9 Obtención de los tubérculos al llegar al final del tiempo de vida de la planta.

Luego de llevar un seguimiento constante a la planta de papa durante aproximadamente 6 meses esta llega a su final de vida se marchita y luego hay que esperar un lapso de tiempo de 20 días para la cosecha ya en la cosecha se obtuvieron los tubérculos de cada una de las 10 plantas, los tubérculos de cada planta se registran y se separan en bolsas Zip log limpias y marcadas con el número correspondiente a la planta como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Muestras obtenidas de las 10 plantas. Se muestran los tubérculos separados en cada bolsa zip log.

5.10 Caracterización de los tubérculos obtenidos de cada planta.

Posteriormente a la obtención de los tubérculos se procede a una caracterización teniendo en cuenta su peso, tamaño, volumen, densidad, para el peso utilizamos una pesa gramera de 200 gramos de referencia BB301-200 y una pesa de 5 kilos para los tubérculos más grandes se procede a realizar el pesaje de cada uno de los tubérculos como se observa en la Figura 16. Para posteriormente ser ingresados a la base de datos.



Figura 16. Peso del tubérculo. Muestra el peso del tubérculo en este caso pesando 111,92 gramos

También se obtiene una medida de su tamaño tanto de su largo transversal como de su largo longitudinal y se mide su volumen utilizando un vaso de precipitado o también llamado Beaker de 500 ml por medio del método de medición del desplazamiento del líquido. Como se muestra en la Figura 17. Ya obteniendo el volumen y su peso podemos calcular su densidad que para la investigación es de mucha importancia ya que podemos determinar el estado del tubérculo en el interior sin necesidad de dañarlo

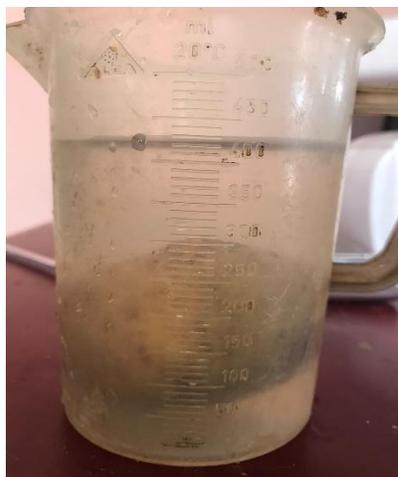


Figura 17. Volumen del tubérculo. Muestra el tubérculo en el Baker obteniendo su volumen.

Posteriormente ya calculado los datos de peso tamaño y volumen se realiza una etiqueta a cada tubérculo como se muestra en la Figura 18.



Figura 18. . Etiqueta del tubérculo. Muestra el tubérculo ya con su etiqueta para posteriormente ser registrado en la base de datos.

5.11 Construcción base de datos de caracterización de tubérculos de cada planta.

Se construye una base de datos morfo métrica de tubérculos de cada planta con codificación de cada tubérculo se define la variable Peso en la segunda columna, su largo longitudinal con la variable TAL en la tercera columna y respectivamente su largo transversal con la variable TAT en la cuarta columna, su volumen con la variable VOL en la quinta columna, su densidad con la variable DEN en la sexta columna y finalmente en la columna 7 realizamos una observación detallada al tubérculo si presenta alguna enfermedad o detalle. Como se muestra en la figura 10. También Se definió un método para clasificación por tamaño esto pensando en el agricultor de la zona ya que el interés de ellos es de y la selección la realizan en 3 tipos de tamaños diferentes que comúnmente le llaman gruesa delgada y richi o muro, entonces se plantea de los datos obtenidos por tamaño hacer una selección de estos tamaños de interés para el agricultor. Se realizará prueba empírica para definición de tamaños, esto porque se ha visto que no hay criterio objetivo.

5.12 Base de datos y comportamiento de variables meteorológicas durante el transcurso de desarrollo de la investigación.

Posteriormente a la implementación de la estación meteorológica de soporte, se comenzó a obtener datos que fueron siendo guardados en memoria micro sd que fueron extraídos y organizados en una tabla así como también se pudo ver el comportamiento gráfico utilizando el software Matlab.

6. Resultados y Análisis

Los resultados se muestran a partir de una comparación de la relación entre el estado de salud del tubérculo de la planta de papa (*solanum tuberosum*) mediante la observación por parte del humano y el monitoreo sistematizado de los indicadores fisiológicos de salud.

6.1 Caracterización de las variables obtenidas a partir de la cuantificación de las imágenes

En la Tabla 3 se muestra las variables que se logró cuantificar a partir de las imágenes

Tabla 3. Cuantificación de imágenes de base de datos de hojas. Fuente: Esta investigación.

Semanas	Unidades de escala	Factor de escala	Área	Perímetro	Circularidad	Altura	Anchura	Densidad integrada	Estado de la hoja
s1h5	Cm	122	7523 314	11.014.356	779.293	3.467.2 13	3.016.39 3	11438833	sana
s2h5	Cm	122	1036 2335	14.742.246	599.156	4.786.8 85	3.540.98 4	10612369	sana
s3h5	Cm	122	1041 6958	10.434.552	636.089	4.803.2 79	2.967.21 3	12480311	sana
s4h5	Cm	122	1149 2005	13.778.399	760.691	4.557.3 77	3.409.83 6	11473462	sana
s5h5	Cm	122	1234 4397	14.599.577	727.778	4.655.7 38	3.508.19 7	19837016	sana

6.2 Base de datos de caracterización de los tubérculos.

Posteriormente a la cosecha se realiza una caracterización de forma manual de los tubérculos descritos en la Tabla 3, en la que se obtiene variables relevantes como se muestra en la Tabla 4 y así poder realizar una correlación con la base de datos.

Tabla 4. Caracterización de tubérculos obtenidos posteriormente a la cosecha. Fuente: Esta investigación.

Planta P1						
	Peso (gr)	TAL (cm)	TAT (cm)	VOL. (cm3)	DEN	
Tubérculo	Peso (gr)	Tamaño - eje longitudinal (cm)	Tamaño - eje transversal (cm)	Volumen cm3	Densidad (Kg/m3)	Observación
1	30.39	4.2	3.9	30	1013.00	tubérculo sano
2	122.93	7.5	6.3	120	1024.42	tubérculo sano
3	105.1	6.6	5.7	110	955.45	tubérculo sano

6.3 Base de datos de las variables medidas de la estación meteorológica.

Se realizó un monitoreo con la estación meteorológica en un periodo de tiempo igual con el que se realizó la toma de imágenes (cada 7 días) en el cual se monitoreó variables importantes como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Monitoreo de estación meteorológica. . Fuente: Esta investigación.

Fecha	Hora	Semanas	Temperatura (C°)	Humedad (%)	Velocidad Viento (Km/h)
24/04/2021	1:00 p.m.	1	9	85	10
1/05/2021	1:00 p.m.	2	9.5	90	7
8/05/2021	1:00 p.m.	3	10	90	7
15/05/2021	1:00 p.m.	4	11	85	9
22/05/2021	1:00 p.m.	5	11	83	8
29/05/2021	1:00 p.m.	6	9.8	88	8
12/06/2021	1:00 p.m.	7	10	84	12
19/06/2021	1:00 p.m.	8	10	85	15
26/06/2021	1:00 p.m.	9	8	85	9
3/07/2021	1:00 p.m.	10	7.5	78	20
10/07/2021	1:00 p.m.	11	8	82	11

Una vez registrados los datos en una tabla de Excel, se obtuvo el comportamiento de las variables mostradas en la Tabla 5. En la Figura 19 se puede evidenciar dicho comportamiento.

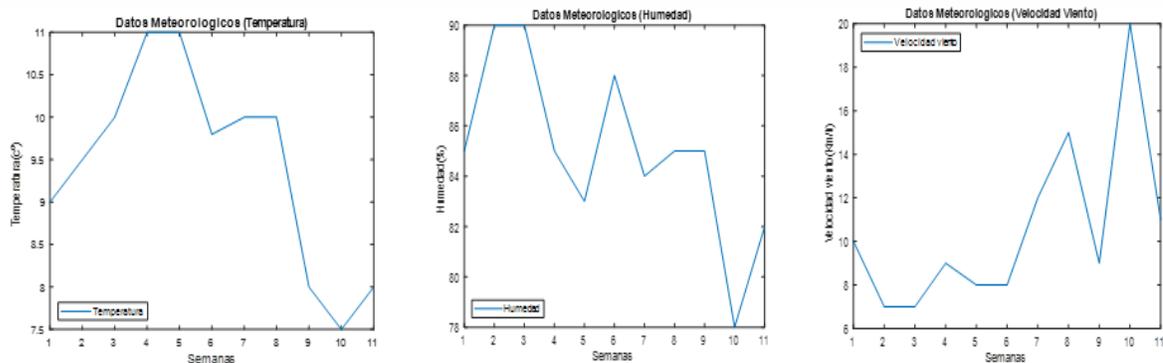


Figura 19. Base de datos. Estación meteorológica y comportamiento de cada una de las variables. . Fuente: Esta investigación.

Los valores máximos y mínimos, y el comportamiento de las variables temperatura, humedad y velocidad de viento, son considerados dentro de parámetros normales. Se observa que no hubo efectos relevantes atípicos sobre la salud de la planta.

6.4 Estadística descriptiva básica de datos.

El set analizado contiene los datos de una muestra $n=10$ plantas de un cultivo de papa. Los frutos recolectados de cada planta son caracterizados en peso, largo transversal, largo longitudinal y volumen. Posteriormente se calcula la densidad. Se analizan $np=278$ tubérculos cosechados en total. En la Figura 20 se muestra la distribución de los datos encontrados de peso final. Se observa una distribución con tendencia central sesgada a la izquierda. El peso de los tubérculos obtenidos en el cultivo de papa sigue una distribución de probabilidad ajustada a la función gamma con asimetría positiva lo cual significa que existe una probabilidad de que en este cultivo haya más papas livianas y que a la vez la probabilidad de que existan papas de mayor tamaño es descendente. Los valores k (factor de forma) y θ (factor de escala) encontrados de la función gamma son: (1.00842, 69.2978).

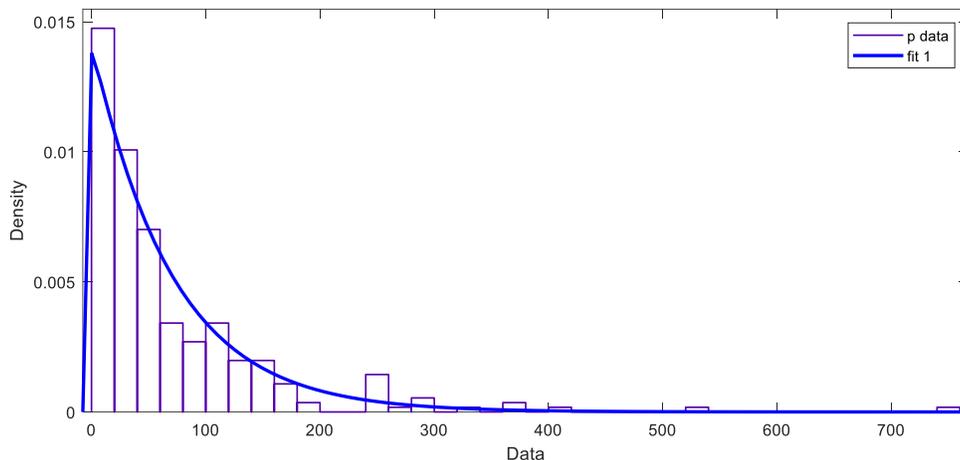


Figura 20. Caracterizados en peso. Muestra la caracterización en peso del número de tubérculos de todo el cultivo

En la Figura 21 se muestra la distribución de los datos encontrados de tamaño transversal final. Se observa una distribución con asimetría positiva. El tamaño de los tubérculos obtenidos en el cultivo de papa sigue una distribución de probabilidad ajustada a la función Gamma (línea azul) con asimetría positiva, lo cual significa que existe una probabilidad de que en este cultivo haya más papas pequeñas que grandes y que la probabilidad de crecimiento con respecto al tamaño es descendente. Sin embargo, la asimetría no es tan pronunciada como para el caso del peso de los tubérculos. La función roja corresponde a un ajuste con una distribución Normal

($\mu=4.33993$ y $\sigma=1.68823$), la cual fue utilizada para realizar una comparación con la función Gamma con la cual se estaba realizando el análisis.

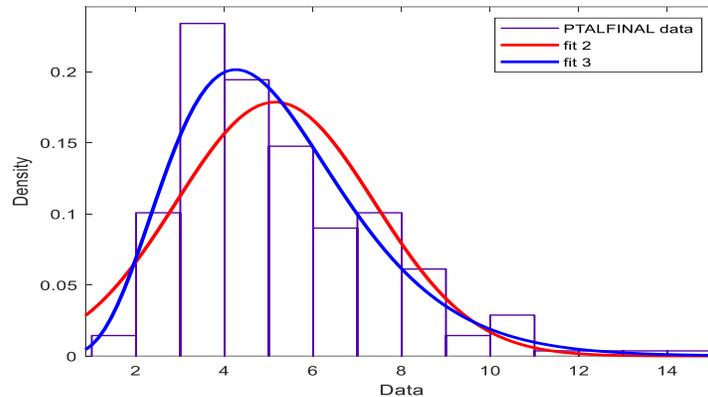


Figura 21. Caracterización en Tamaño transversal. Muestra la caracterización en Tamaño transversal del número de tubérculos de todo el cultivo. Fuente: Esta investigación.

En la Figura 22 se muestra la distribución de los datos encontrados de tamaño longitudinal final. Se observa una distribución con tendencia central con asimetría positiva, como muestra la función gamma (color azul). La función roja corresponde a un ajuste con una distribución Normal ($\mu=4.33993$ y $\sigma=1.68823$), la cual fue utilizada para realizar una comparación con la función Gamma con la cual se estaba realizando el análisis. Esto significa que el tamaño longitudinal de los tubérculos se ajusta adecuadamente con una función de probabilidad gamma con cierta tendencia central, lo cual a su vez significa que hay una mayor probabilidad de obtener tubérculos con un tamaño longitudinal menor.

En la Figura 23 se muestra la distribución de los datos encontrados de volumen. Se observa una distribución con asimetría positiva. La figura muestra un ajuste con una función de distribución Gamma (color azul) donde indica que el cultivo tiende a tener tubérculos de menor volumen. Los valores k y θ encontrados de la función gamma son: (1.07341, 58.1952).

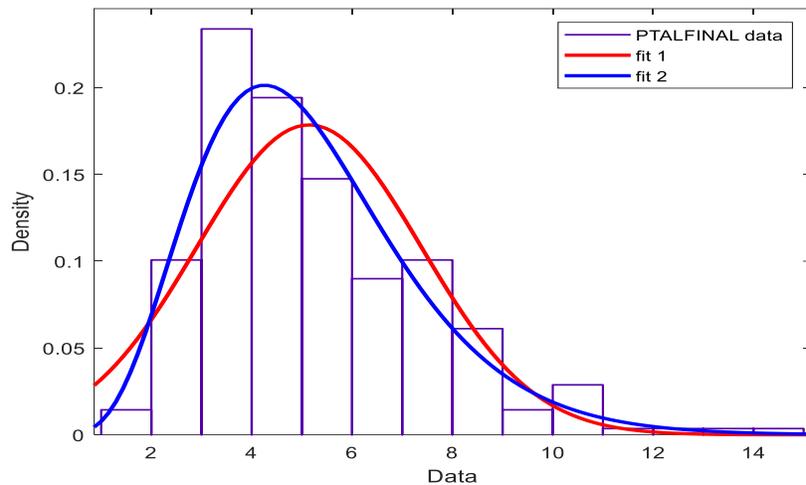


Figura 22. Caracterización en Tamaño longitudinal final. Muestra la caracterización en Tamaño longitudinal final del número de tubérculos de todo el cultivo. Fuente: Esta investigación.

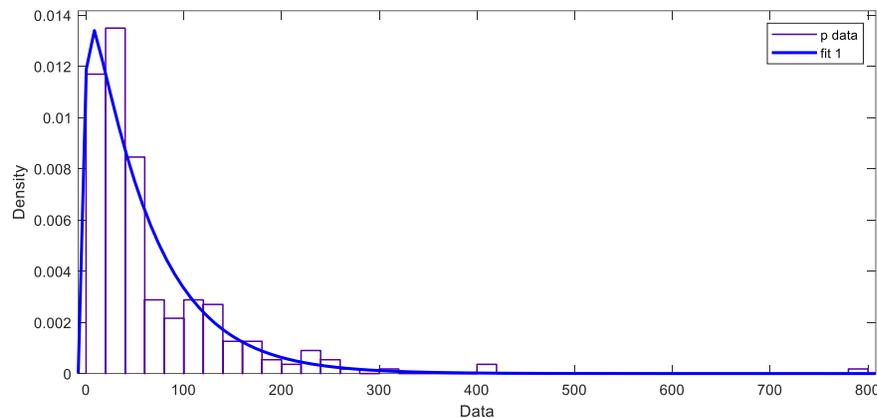


Figura 23. Caracterización en volumen. Muestra la caracterización en volumen del número de tubérculos de todo el cultivo. Fuente: Esta investigación.

En la Figura 24 se muestra la distribución de los datos encontrados de densidad final. Se observa una distribución con tendencia central. La densidad de las papas sigue una distribución de probabilidad ajustada con la función de densidad de probabilidad Normal. La función roja corresponde a un ajuste con una distribución Normal ($\mu = 1102.82$ y $\sigma = 241.742$). Esta caracterización puede llegar a ser útil en una investigación futura mediante un modelo de predicción basado en las características encontradas en la presente investigación ya que en este caso significa que existe una probabilidad alta de que los tubérculos alcancen una densidad de tendencia central para toda la muestra, lo cual equivale a tipicidad o uniformidad del resultado.

Además se observa que la dispersión no es alta, lo cual implica que la densidad de la muestra es regular; lo cual a su vez muestra pocos defectos en la constitución interna de los tubérculos.

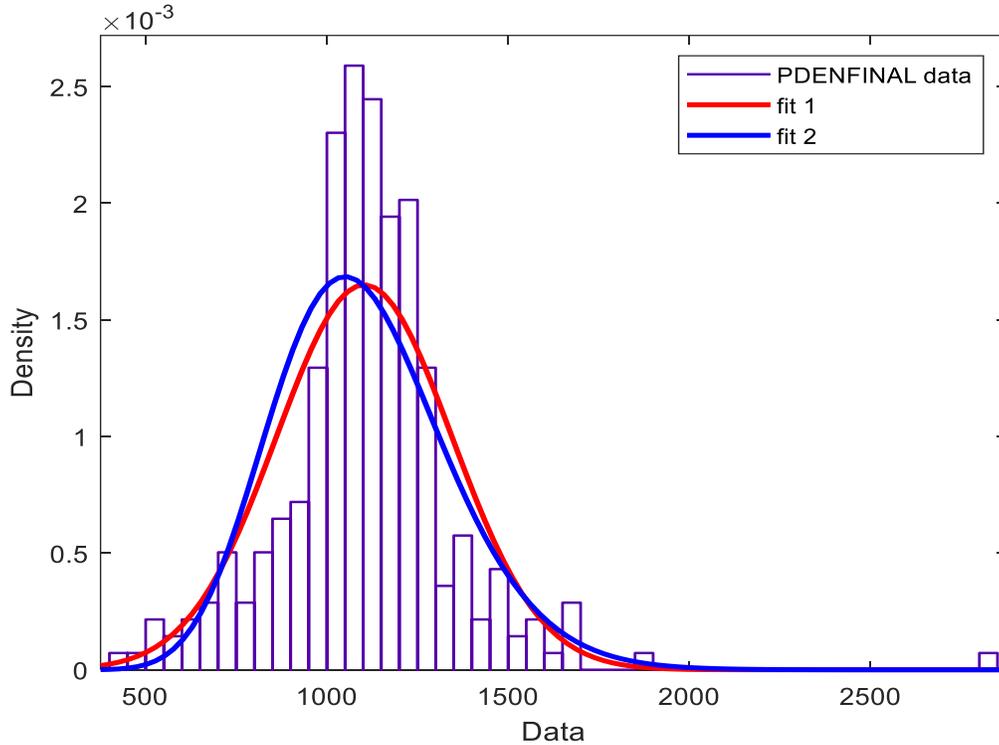


Figura 24. Caracterizados en densidad. Muestra la caracterización en densidad del número de tubérculos de todo el cultivo. Fuente: Esta investigación.

6.5 Evolución hojas en el tiempo.

Mediante el software Matlab se observó el comportamiento de la evolución de las hojas durante el periodo de crecimiento de cada una de las hojas en estudio en este caso de cómo fue la evolución de su área foliar de las hojas de la planta en estudio 1 (PE1) como se muestra en la Figura 25.

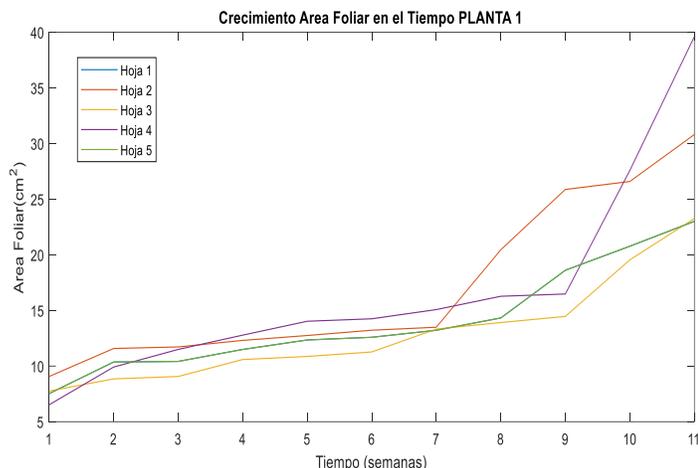


Figura 25. Evolución Área Foliar hojas. Muestra la evolución del Área foliar de la planta 1 semana tras semana

Se observó el comportamiento de la evolución de crecimiento del perímetro de cada hoja en este caso como ejemplo se toma la PE10 como se muestra en la Figura 26.

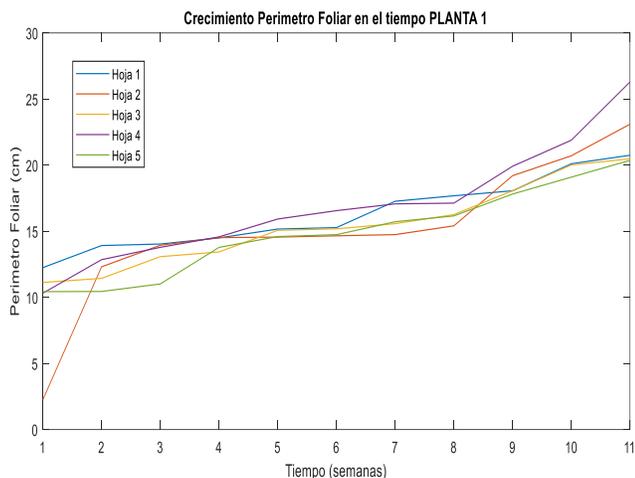


Figura 26. Evolución perímetro foliar hojas. Muestra la evolución del perímetro foliar de la planta 10 las hojas semana tras semana

Se observó el comportamiento y evolución de la circularidad foliar de cada hoja en estudio observando un crecimiento ascendente hasta aproximadamente la tercera semana para luego estabilizarse un poco el tamaño teniendo como ejemplo la PE7 Figura 27.

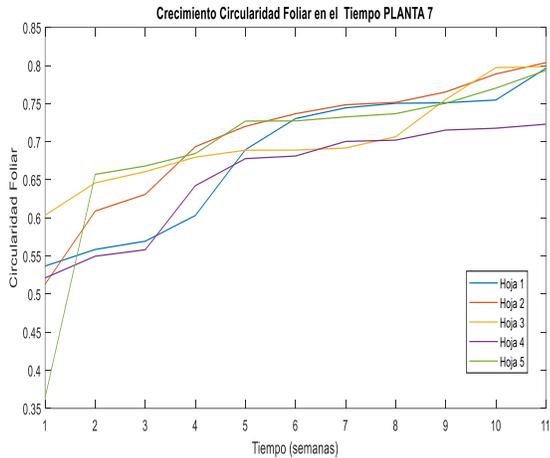


Figura 27. Evolución Circularidad Foliar hojas. Muestra la evolución de la circularidad foliar de la planta 7 semana tras semana

Se observó mediante el software Matlab la evolución de la altura que fueron obteniendo las hojas que en este caso tomamos como ejemplo la planta 6 de la Figura 28.

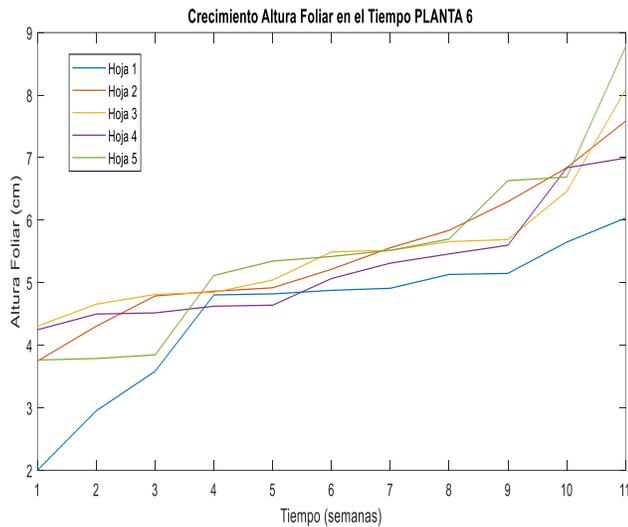


Figura 28. Evolución Altura Foliar hojas. Muestra la evolución de la Altura Foliar de la planta 6 semana tras semana

Se observó mediante el software Matlab la evolución de la anchura que fueron obteniendo las hojas que en este caso tomamos como ejemplo la PE4 Figura 29.

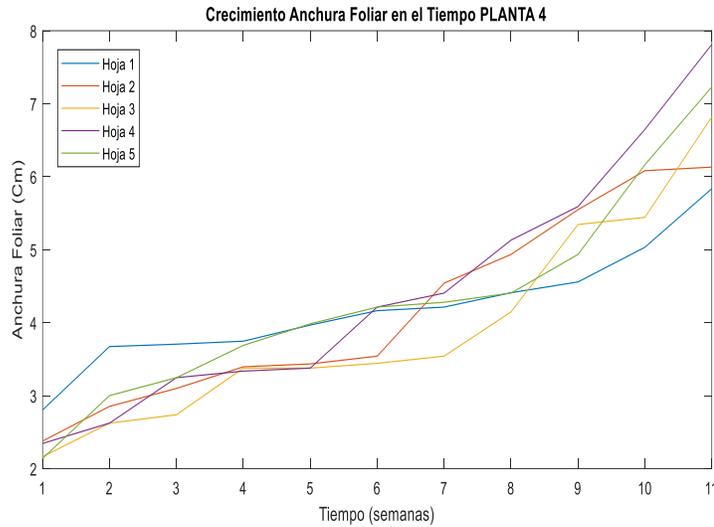


Figura 29. Evolución Anchura Foliar hojas. Muestra la evolución de la Anchura Foliar de la planta 4 semana tras semana

6.6 Pendientes del crecimiento foliar de las hojas

Posteriormente se observa el comportamiento de cada una de las variables en estudio como es el caso de su área, perímetro, circularidad, altura y anchura. Se extrae una pendiente de cada hoja obteniendo así 5 pendientes por planta de las cuales fue necesario realizar un promedio de las 5 hojas de cada planta en estudio, esto con el fin de correlacionar más adelante con las demás variables. Se realizó el mismo procedimiento con las variables de los tubérculos como se puede evidenciar en la Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6. Pendientes promedio 10 plantas en estudio

Pendientes Promedio 10 plantas en estudio				
Área	Perímetro	Circularidad	Altura	Anchura
1.234	1.501	2.479	2.969	2.232
1.424	3.006	5.420	3.666	3.383
1.493	6.212	5.350	4.103	4.159
1.845	1.606	4.880	3.615	4.112
1.886	1.730	2.751	3.593	2.673
1.932	3.574	2.340	3.763	3.114
2.257	5.519	1.365	2.863	2.644
2.930	5.519	1.365	2.863	2.644
2.976	3.556	1.466	2.342	2.396
3.901	6.677	1.928	2.239	2.251

Tabla 7. Promedio Tubérculos

Promedio Tubérculos						
		PESO (gr)	TAL (cm)	TAT (cm)	VOL (cm3)	DEN
Plantas	Nº tubérculos	Peso (gr)	Tamaño - eje longitudinal (cm)	Tamaño - eje transversal (cm)	Volumen cm3	Densidad (Kg/m3)
P1	16	46.7413889	4.35555556	3.74722222	42.5	1104.179602
P2	17	60.7082927	5.27073171	4.43170732	51.8292683	1171.066698
P3	18	49.4591176	4.71764706	4.01176471	44.2647059	1107.572149
P4	26	115.693846	6.08076923	5.11538462	98.2692308	1178.863421
P5	28	98.586875	6.4375	5.4125	93.4375	1060.701903
P6	29	77.2671429	5.01071429	4.4	74.2857143	1186.529563
P7	33	48.0733333	4.57575758	3.89090909	43.969697	1052.507711
P8	34	83.8788235	5.47647059	4.53529412	77.6470588	991.3001345
P9	36	105.056667	5.86666667	4.67222222	87.7777778	1090.767505
P10	41	66.2548276	5.02068966	4.17586207	59.4827586	1003.44692

6.7 Comparaciones a partir de los datos obtenidos de las imágenes y de los tubérculos

Para el proceso de comparación de los datos obtenidos, se eligió la técnica de búsqueda de correlaciones por pares de variables. Se obtuvo correlaciones de las distintas variables que fueron medidas tanto en la cuantificación de las imágenes de las hojas, tales como mediante las aplicaciones incorporadas del software Matlab utilizando la función de Curve fitting como la caracterización de los tubérculos. Se obtuvieron los promedios y pendientes de estos, donde una vez depurado los datos se realizaron las correlaciones entre la combinación de las variables tanto de imágenes como tubérculos. Se realizó 25 combinaciones las cuales se obtuvieron una correlación con una bondad alta, es decir para este caso superior a 0.8, a partir del software de Matlab, utilizando la función de R-Cuadrado.

6.8 Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con número de tubérculos por planta.

Se realizaron cinco comparaciones con las pendientes promedio de las plantas (perímetro foliar, área foliar, altura foliar, anchura foliar y circularidad foliar) con número de tubérculos por planta, el resultado fue satisfactorio ya que se obtuvo un R-cuadrado superior a 0.8 en las cinco combinaciones, estas fueron clasificadas en una tabla de forma ascendente para realizar un

análisis de acuerdo a los resultados obtenidos, en primera instancia se muestra la Tabla 8 en la cual se clasificó los resultados de las correlaciones obtenidas

Tabla 8. Correlación Pendientes promedio de plantas con Número de Tubérculos por Planta

Correlación R2 % pendientes promedio de plantas con numero Tubérculos por planta	
Perímetro Foliar	0,9619
Altura Foliar	0,8897
Área Foliar	0,8699
Anchura Foliar	0,8398
Circularidad Foliar	0,81

Una vez realizada la evaluación de la Tabla 8 de las correlaciones, se diagnostica que con estas cinco variables en comparación con el número de tubérculos por cada planta, se puede afirmar que a mayor perímetro, área, altura, anchura y circularidad foliar mayor cantidad de tubérculos se obtendrá. Siendo la correlación del perímetro foliar la más notoria.

El resultado de la comparación con mayor porcentaje de correlación en este caso fue del perímetro foliar vs número de tubérculos, obteniendo un R-Cuadrado de 0.9619. Entonces, se puede partir a realizar un diagnóstico más general en cuanto a la altura y anchura de la hoja ya que este parte de estas dos variables, identificando de esta manera que a mayor perímetro foliar mayor número de tubérculos se obtendrá. Se puede mirar en la Figura 30 la tendencia del R-Cuadrado obtenido a partir del software de Matlab con la función de curve fitting tool.

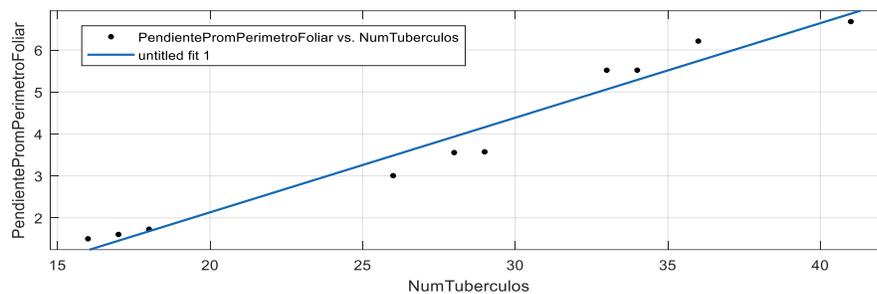


Figura 30. Correlación. Muestra la correlación de pendiente promedio perímetro foliar vs número de tubérculos

La ecuación 1 representa el comportamiento de las dos variables en el medio estudiado, en este caso la correlación mostrada en la Figura 30. A partir de aquí se obtienen los coeficientes con un límite de confiabilidad de los valores de predicción de 0 a 1 mostrados en las ecuaciones

2 y 3; posteriormente, se obtiene la bondad de ajuste en ecuación 6 en la que se obtiene el resultado de los coeficientes que es el R-cuadrado, el resultado de este es un modelo de predicción que varía entre 0 y 1, entre más cerca de 1 se encuentre hay mayor probabilidad de realizar una buena predicción.

Modelo lineal:

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (1)$$

$$p1 = 0.2254(0.1888, 0.262) \quad (2)$$

$$p2 = -2.376(-3.436, -1.316) \quad (3)$$

Bondad de ajuste:

$$SSE: 1.337 \quad (4)$$

$$R - cuadrado: 0.9619 \quad (5)$$

$$R - cuadrado ajustado: 0.9571 \quad (6)$$

$$RMSE: 0.4088 \quad (7)$$

6.9 Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con peso promedio de tubérculos por planta.

Se realizó cinco comparaciones con las pendientes promedio de las plantas (perímetro foliar, área foliar, altura foliar, anchura foliar y circularidad foliar) con peso promedio por planta. El resultado fue satisfactorio ya que se obtuvo un R-cuadrado superior a 0.89 en las cinco combinaciones, estas fueron clasificadas en una tabla de forma ascendente para realizar un análisis de acuerdo a los resultados obtenidos, en primera instancia se muestra la Tabla 9 en la cual se clasificó los resultados de las correlaciones obtenidas.

Tabla 9. Pendientes promedio de plantas con Peso promedio de Tubérculos por Planta

Correlación R2 % pendientes promedio de plantas con Peso promedio Tubérculos por planta	
Perímetro Foliar	0.955
Circularidad Foliar	0.9392
Área Foliar	0.9383
Anchura Foliar	0.9288
Altura Foliar	0.8902

Una vez realizada la evaluación de la Tabla 9 de las correlaciones, se diagnostica que con estas cinco variables en comparación con el número de tubérculos por cada planta, se puede afirmar que también sigue la tendencia que la variable de perímetro es la que tiene mayor porcentaje de correlación con el peso promedio de los tubérculos con un R cuadrado de 0.955. Con este resultado se pudo observar que hojas de mayor perímetro tendrían tubérculos de mayor peso. Como se puede mirar en la Figura 31 la tendencia de correlación obtenida mediante la aplicación que está incluida en el software de Matlab curve fitting tool.

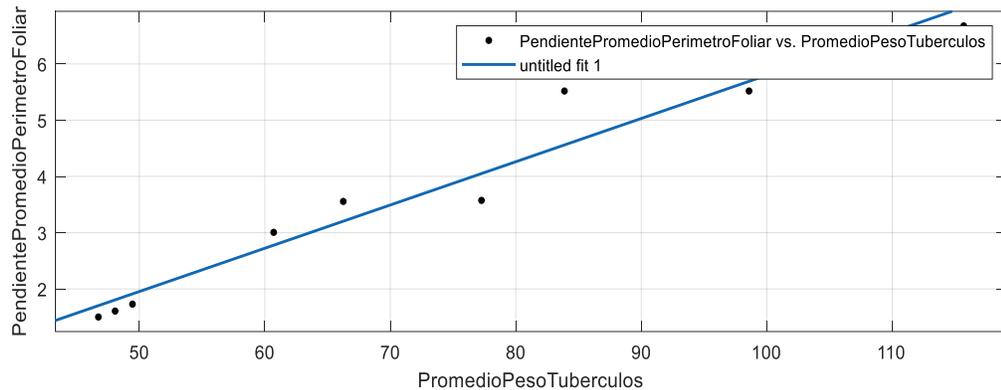


Figura 31. Correlación. Muestra la correlación de pendiente promedio perímetro foliar vs Peso promedio de tubérculos

La Ecuación 7 representa el comportamiento de las dos variables en el medio estudiado, en este caso la correlación mostrada en la Figura 31. A partir de aquí se obtienen los coeficientes con un límite de confiabilidad de los valores de predicción de 0 a 1 mostrados en las ecuaciones 8 y 9; posteriormente, se obtiene la bondad de ajuste en ecuación 11 la que se obtiene el resultado de los coeficientes que es el R-cuadrado, en el que se obtiene un modelo de predicción que varía entre 0 y 1, entre más cerca de 1 se encuentre hay mayor probabilidad de realizar una buena predicción.

Modelo lineal:

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (7)$$

$$p1 = 0.07693(0.06331, 0.09054) \quad (8)$$

$$p2 = -1.893(-2.966, -0.8195) \quad (9)$$

Bondad de ajuste:

$$SSE: 1.577 \quad (10)$$

$$R - \text{cuadrado}: 0.955 \quad (11)$$

$$R - \text{cuadrado ajustado}: 0.9494 \quad (12)$$

$$RMSE: 0.444 \quad (13)$$

6.10 Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con Tamaño longitudinal promedio por planta.

Se realizó cinco comparaciones con las pendientes promedio de las plantas (perímetro foliar, área foliar, altura foliar, anchura foliar y circularidad foliar) con Tamaño longitudinal promedio por planta, el resultado fue satisfactorio ya que se obtuvo un R-cuadrado superior a 0.898% en las cinco combinaciones. Estas fueron clasificadas en una tabla de forma ascendente para realizar un análisis de acuerdo a los resultados obtenidos, en primera instancia se muestra la Tabla 10 en la cual se clasificó los resultados de las correlaciones obtenidas.

Tabla 10. Correlación Pendientes promedio de Plantas con Tamaño Longitudinal promedio de Tubérculos por planta

Correlación R2 % pendientes promedio de plantas con Tamaño longitudinal promedio de Tubérculos por planta	
Área Foliar	0.9599
Anchura Foliar	0.9406
Perímetro Foliar	0.9398
Circularidad Foliar	0.9266
Altura Foliar	0.898

Una vez realizada la evaluación de la Tabla 10 de las correlaciones, se diagnostica que con estas cinco variables en comparación con el número de tubérculos por cada planta, además de obtener una buena correlación el perímetro de las hojas se evidencia que la variable con mayor porcentaje es el área foliar con un R cuadrado de 0.9599. Sin embargo, la correlación con el perímetro foliar sigue siendo relevante y muy cercana.

Con este resultado se podría predecir que las hojas con mayor área foliar obtendrán tubérculos con mayor tamaño. Como se puede mirar en la Figura 32 la tendencia de correlación obtenida mediante la aplicación que está incluida en el software de Matlab curve fitting tool.

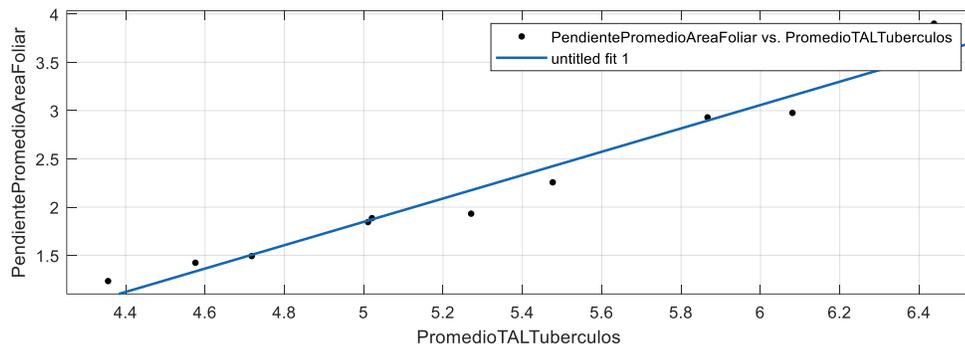


Figura 32. Correlación. Muestra la correlación de pendiente Área foliar vs Tamaño longitudinal promedio de tubérculos

La ecuación 14 representa el comportamiento de las dos variables en el medio estudiado, en este caso la correlación mostrada en la Figura 32. A partir de aquí se obtienen los coeficientes con un límite de confiabilidad de los valores de predicción de 0 a 1 mostrados en las ecuaciones 15 y 16; posteriormente, se obtiene la bondad de ajuste en ecuación 19 en la que se obtiene el resultado de los coeficientes que es el R-cuadrado, en el que se obtiene un modelo de predicción que varía entre 0 y 1, entre más cerca de 1 se encuentre hay mayor probabilidad de realizar una buena predicción.

Modelo lineal:

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (14)$$

$$p1 = 1.918(0.9567, 2.88) \quad (15)$$

$$p2 = 2.032(0.3805, 3.684) \quad (16)$$

Bondad de ajuste:

$$SSE: 1.144 \quad (17)$$

$$R - \text{cuadrado}: 0.9599 \quad (18)$$

$$R - \text{cuadrado ajustado}: 0.9494 \quad (19)$$

$$RMSE: 0.444 \quad (20)$$

6.11 Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con Tamaño Transversal promedio por planta.

Se realizó cinco comparaciones con las pendientes promedio de las plantas (perímetro foliar, área foliar, altura foliar, anchura foliar y circularidad foliar) con Tamaño transversal promedio de tubérculos, el resultado fue satisfactorio ya que se obtuvo un R-cuadrado superior a 0.8559 en las cinco combinaciones, estas fueron clasificadas en una tabla de forma ascendente para realizar un análisis de acuerdo a los resultados obtenidos, en primera instancia se muestra la Tabla 11 en la cual se clasificó los resultados de las correlaciones obtenidas.

Tabla 11. Correlación Pendientes promedio de la Plantas con Tamaño Transversal de Tubérculos por Planta

Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con Promedio Tamaño Transversal de Tubérculos por planta	
Anchura Foliar	0.9411
Área Foliar	0.9363
Circularidad Foliar	0.9027
Perímetro Foliar	0.883
Altura Foliar	0.8559

Una vez realizada la evaluación de la Tabla 11 de las correlaciones, El resultado de la comparación con mayor porcentaje de correlación en este caso fue la anchura y área foliar vs Tamaño transversal promedio de tubérculos, obteniendo un R-Cuadrado de 0.9411 de donde se puede partir a realizar un diagnóstico más general en cuanto al perímetro, altura y circularidad de la hoja. Se identificó de esta manera que a mayor anchura y área foliar mayor tamaño transversal de tubérculos se obtendrá. Se puede observar en la Figura 33 la tendencia de correlación del R-Cuadrado obtenida a partir del software de Matlab con la función de curve fitting tool.

La ecuación 21 representa el comportamiento de las dos variables en el medio estudiado, en este caso la correlación mostrada en la Figura 33. A partir de aquí se obtienen los coeficientes

con un límite de confiabilidad de los valores de predicción de 0 a 1 mostrados en las ecuaciones 22 y 23. Posteriormente, se obtiene la bondad de ajuste en ecuación 26 en la que se obtiene el resultado de los coeficientes que es el R-cuadrado.

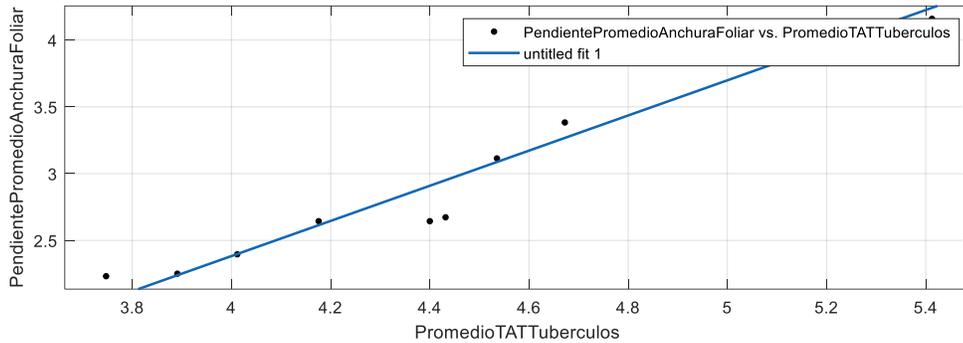


Figura 33. Correlación. Muestra la correlación de pendiente Área foliar vs Tamaño Transversal promedio de tubérculos

Modelo lineal:

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (21)$$

$$p1 = 1.316cm(1.047,1.584) \quad (22)$$

$$p2 = -2.88cm(-4.078,-1.681) \quad (23)$$

Bondad de ajuste:

$$SSE: 0.2709 \quad (24)$$

$$R - cuadrado: 0.9411 \quad (25)$$

$$R - cuadrado ajustado: 0.9338 \quad (26)$$

$$RMSE: 0.184 \quad (27)$$

6.12 Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con promedio volumen de tubérculos por planta.

Se realizó cinco comparaciones con las pendientes promedio de las plantas (perímetro foliar, área foliar, altura foliar, anchura foliar y circularidad foliar) con promedio volumen de tubérculos por planta, el resultado fue satisfactorio ya que se obtuvo un R-cuadrado superior a 0.86 en las cinco combinaciones, estas fueron clasificadas en una tabla de forma ascendente para

realizar un análisis de acuerdo a los resultados obtenidos, en primera instancia se muestra la Tabla 12 en la cual se clasificó los resultados de las correlaciones obtenidas.

Tabla 12. Correlación Pendientes promedio de las Plantas con Volumen de Tubérculos por Planta

Correlación R2 % pendientes promedio de las plantas con Promedio volumen de Tubérculos por planta	
Perímetro Foliar	0,9463
Altura Foliar	0,9134
Circularidad Foliar	0,8996
Área Foliar	0,8736
Anchura Foliar	0,8639

Una vez realizada la evaluación de la Tabla 12 de las correlaciones. El resultado de la comparación con mayor porcentaje de correlación en este caso fue el perímetro foliar vs promedio volumen de tubérculos por planta, obteniendo un R-Cuadrado de 0.94663 obteniendo un buen modelo de predicción. Se puede afirmar que se podría realizar un diagnóstico general en cuanto a la altura y anchura de la hoja ya que este parte de estas dos variables, identificando de esta manera que a mayor perímetro foliar mayor volumen tendrán los tubérculos. Se puede mirar que la Figura 34 muestra una tendencia de R-Cuadrado obtenida a partir del software de Matlab con la función de curve fitting tool.

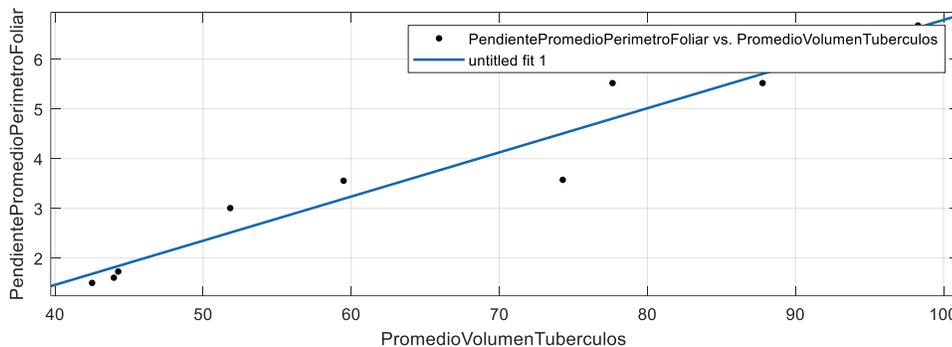


Figura 34. Correlación. Muestra la correlación de pendiente promedio perímetro foliar vs promedio volumen tubérculos

La ecuación 28 representa el comportamiento de las dos variables en el medio estudiado, en este caso la correlación mostrada en la Figura 34. A partir de aquí se obtienen los coeficientes con un límite de confiabilidad de los valores de predicción de 0 a 1 mostrados en las ecuaciones

29 y 30. Posteriormente, se obtiene la bondad de ajuste en ecuación 33 en la que se obtiene el resultado de los coeficientes que es el R-cuadrado, en el que se obtiene un modelo de predicción que varía entre 0 y 1, entre más cerca de 1 se encuentre hay mayor probabilidad de realizar una buena predicción.

$$f(x) = p1 * x + p2 \quad (28)$$

$$p1 = 0.08878(0.07155, 0.106) \quad (29)$$

$$p2 = -2.089(-3.303, -0.8757) \quad (30)$$

Bondad de ajuste:

$$SSE: 1.881 \quad (31)$$

$$R - cuadrado: 0.9463 \quad (32)$$

$$R - cuadrado ajustado: 0.9396 \quad (33)$$

$$RMSE: 0.4849 \quad (34)$$

Se realizó la observación grafica en el tiempo de cómo se comportaron las variables meteorológicas de Temperatura, Humedad y velocidad de viento durante el periodo de crecimiento de la planta que duro 11 semanas. Se utilizó para la comparación el crecimiento promedio que tuvieron los perímetros de las hojas durante su crecimiento. Ya que esta variable fue una de las que mostró mayor correlación frente a la evolución de los tubérculos en el tiempo. El resultado obtenido fue satisfactorio, fueron datos que estuvieron a favor de la planta, sin causar daños en esta, dejando de tal manera que su evolución casi no dependiera de estos fenómenos naturales. En la Figura 35 se muestra la evolución de las hojas en tiempo con respecto a los datos meteorológicos y la pendiente promedio de perímetro foliar.

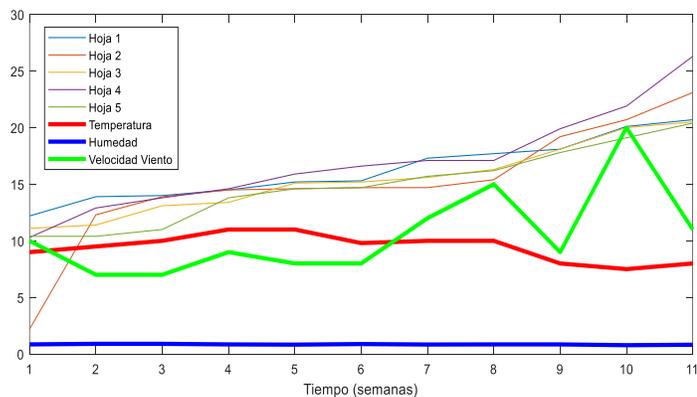


Figura 35. Evolución del perímetro foliar de las plantas con respecto a los datos meteorológicos.

Resumiendo, el método de análisis del ajuste de datos fue el análisis del coeficiente de determinación R-Cuadrado. Este valor se sitúa entre 0 y 1; cuanto mayor sea el valor de R-Cuadrado, mejor será el ajuste a una función lineal. Como se observa en la Tabla 8, y a partir de la Figura 30, el valor mayor de R-Cuadrado se obtuvo entre los datos de crecimiento de perímetro foliar y número de tubérculos (R-Cuadrado = 0.9619).

Cabe resaltar que todas las correlaciones fueron buenas, pero la que más se destacó de las demás fue la del perímetro, que obtuvo buenas correlaciones con el peso, volumen, tamaño longitudinal y transversal. Obteniendo R-Cuadrados superiores a 0.916 y a diferencia del caso anterior del número de tubérculos que en la mayoría de los casos esto se define al inicio, la relación parece ser más lógica debido a que estas variables fisiológicas del tubérculo tienden a cambiar en el tiempo. Por ejemplo, se puede concluir que un modelo lineal de primer orden sería bueno para predecir que a mayor perímetro foliar mayor peso, volumen y un mayor tamaño longitudinal y transversal en condiciones normales. Estos resultados muestran que es factible poder realizar a futuro un pronóstico para un año consecutivo.

Luego de obtener los datos en Matlab y de analizar el comportamiento mostrado en la Figura 23, posteriormente se realizó el procedimiento de sacar máximos y mínimos y promedio de los datos como se muestra en la Figura 36 y que estos seas más trabajables. Como ejemplo se toma el crecimiento foliar de las hojas seleccionadas de la planta 1. Cabe resaltar que el proceso se realizó con las 10 plantas.

En la Figura 36 y Figura 37 se observa en azul la línea la unión de puntos máximos y mínimos para el crecimiento del perímetro foliar y área foliar. La línea roja se construye con los promedios del perímetro foliar y área foliar en cada tiempo de muestra.

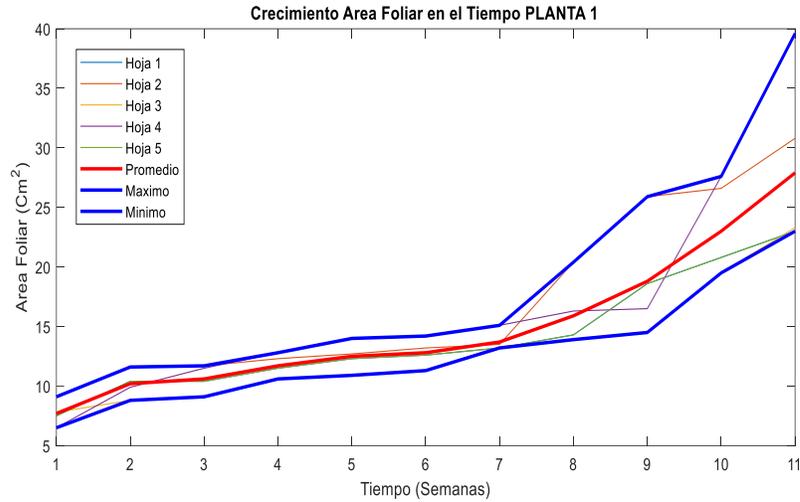


Figura 36. Pendiente crecimiento Área foliar

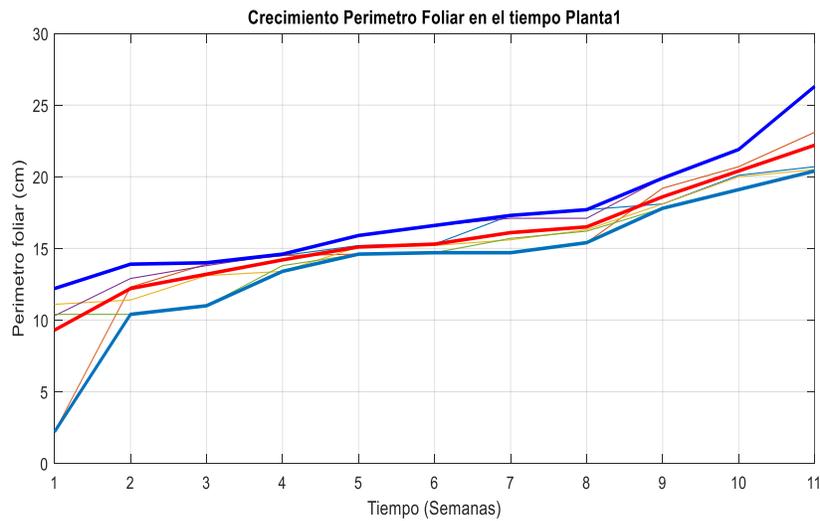


Figura 37. Pendiente crecimiento Perímetro foliar

6.13 Modelado y pronóstico.

Hasta el momento se ha visto cómo utilizar toda la metodología para efectos del diagnóstico el cual está soportado con los análisis de correlación predichos. A partir de allí con estos datos y mediante hipótesis del futuro se puede construir un marco para el pronóstico a partir de los datos recolectados y futuros datos obtenidos en posteriores cosechas. En las siguientes gráficas Figura 38 y Figura 39 se observa el comportamiento donde se utiliza un modelo polinómico de tercer orden de ajuste de los datos de perímetro foliar en comparación con

el tamaño del tubérculo, y de área foliar en comparación con el tamaño del tubérculo. Las curvas azules representan el ajuste con los máximos y la roja representa el ajuste con los promedios. Los modelos encontrados permiten definir un comportamiento para la temporada de recolección de datos. De igual forma, en el contexto del pronóstico, se puede afirmar que si las condiciones para un año consecutivo fueran las mismas (con los criterios de probabilidad), sería posible utilizar esta información encontrada en el año actual como aprendizaje para predicción de resultados del año siguiente.

El modelo tiene la forma:

$$f1 = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4$$

Donde los parámetros p_i son encontrados por medio de un proceso de regresión por medio de Matlab. Tanto para el perímetro como con el área foliar los parámetros P para la curva promedio, máximo y mínimo son presentados en la Tabla 13 y Tabla 14.

Tabla 13. Parámetros P mediante regresión lineal de perímetro foliar.

	Parámetros P del Perímetro foliar		
	Promedio	Máximo	Mínimo
$p1$	0.02922	0.02997	0.0571
$p2$	-0.5045	-0.4214	-1.139
$p3$	3.464	2.445	7.851
$p4$	6.572	10.15	-3.322

Tabla 14. Parámetros P mediante regresión lineal de área foliar.

	Parámetros P del Área foliar		
	Promedio	Máximo	Mínimo
$p1$	0.04641	0.06173	0.03925
$p2$	-0.6304	-0.734	-0.5746
$p3$	3.422	3.547	3.324
$p4$	5.064	6.397	3.786

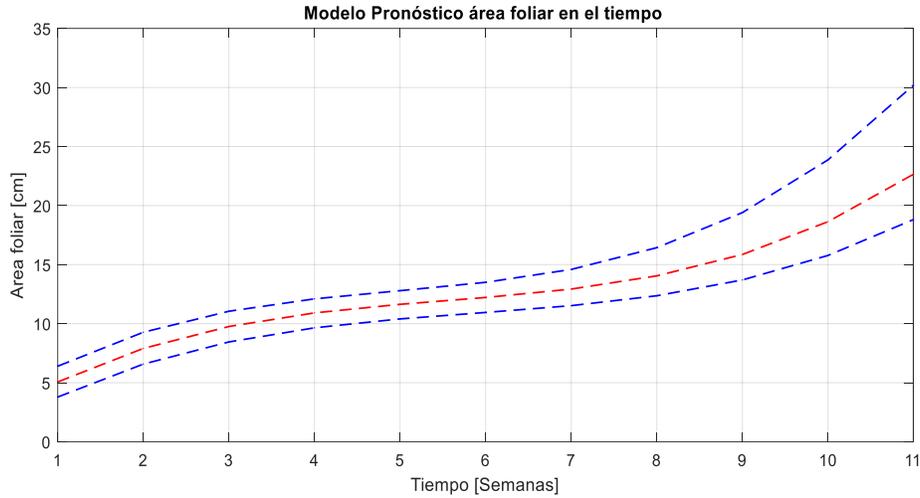


Figura 38. Modelo polinómico de tercer orden de ajuste de los datos del área foliar

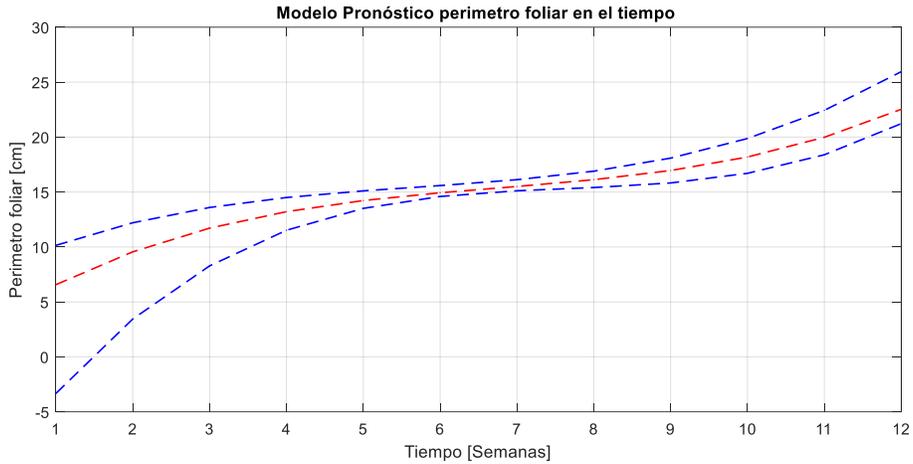


Figura 39. Modelo polinómico de tercer orden de ajuste de los datos del perímetro foliar

La utilidad de estos modelos para efectos de pronóstico se evidencia en la Figura 40. En la figura se muestra el resultado del modelo con los datos de la primera temporada (aprendizaje histórico logrado para el momento para la temporada de toma de datos). Se muestran entonces algunos puntos de ejemplo, de datos de una temporada consecutiva, por ejemplo el punto A en la figura. Se concluye que este nuevo punto A se encuentra dentro de la zona configurada por el modelo encontrado previamente. Se puede interpretar que el comportamiento viene consistente con el año inmediatamente anterior, Note el punto B. Y Note que el punto C, se sale del rango. En este caso habrá que incluir el nuevo punto, realizar nuevamente los modelos de ajuste y

tenerlo en cuenta para el año que viene. Cuanta más información histórica se tenga, mejor sería el pronóstico.

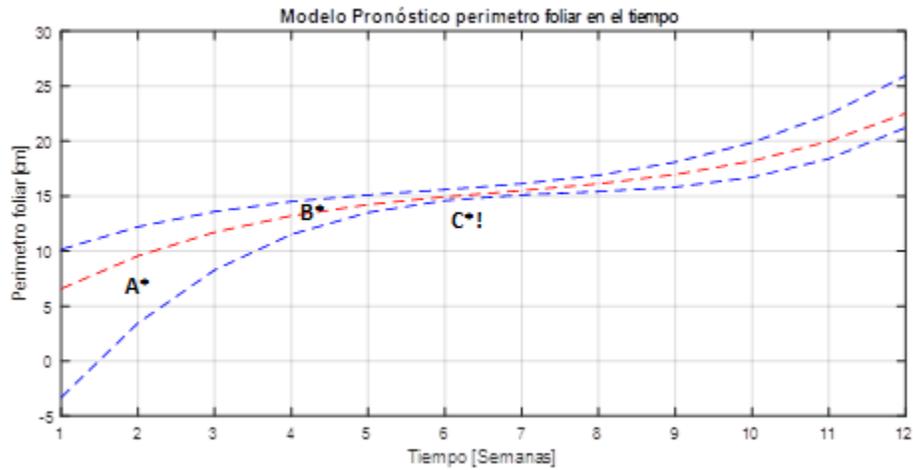


Figura 40. Aprendizaje histórico del modelo de polinomio de tercer orden de perímetro foliar en el tiempo

7. Conclusiones y Recomendaciones

El tamaño de los tubérculos obtenidos en el cultivo de papa sigue una distribución de probabilidad ajustada a la función gama con sesgo hacia la izquierda lo cual significa que existe una probabilidad de que en este cultivo haya más papas pequeñas que grandes.

El peso de los tubérculos obtenidos en el cultivo de papa sigue una distribución de probabilidad ajustada a la función gama con sesgo hacia la izquierda lo cual significa que existe una probabilidad de que en este cultivo haya más papas livianas.

La densidad de las papas sigue una distribución de probabilidad ajustada a la función normal lo cual significa que existe una probabilidad de que en este cultivo la tendencia sea central.

Existe un buen grado de correlación de 0.9619 % entre la pendiente promedio de crecimiento de cada hoja (área foliar) de las plantas con el número de tubérculos obtenidos posteriormente a la cosecha.

Existe un buen grado de correlación de 0.89% entre la pendiente promedio de crecimiento de cada hoja (área foliar) de las plantas con el peso promedio de los tubérculos obtenidos, se obtuvo un buen modelo de correlación en la que se puede predecir o diagnosticar que a mayor perímetro foliar mayor peso tendrán los tubérculos.

Existe un buen grado de correlación de 0.898% entre la pendiente promedio de crecimiento de cada hoja (área foliar) de las plantas con el tamaño longitudinal promedio por planta, existe un alto grado de correlación y se obtiene un modelo en el cual se diagnostica que a mayor área foliar mayor tamaño longitudinal tendrá el tubérculo.

Existe un buen grado de correlación de 0.9411 % entre la anchura foliar y tamaño transversal de los tubérculos, un modelo en el que se puede predecir o diagnosticar que a mayor anchura foliar mayor tamaño transversal podrán tener los tubérculos.

El perímetro foliar fue uno de los parámetros que más correlación obtuvo con diferentes variables medidas de los tubérculos, obtuvo un buen grado de correlación de 0.94663 % con respecto al promedio volumen de tubérculos por planta, en la que se puede predecir que a mayor perímetro foliar mayor volumen obtendrán los tubérculos.

Se recomienda continuar el análisis propuesto para una época sucesiva y a partir de allí validar escenarios de pronóstico.

Se recomienda continuar en la sub-línea de investigación agricultura de precisión con proyectos basados en los resultados experimentales encontrados en esta investigación.

Referencias

- Bioenciclopedia. (2015). *Papa, Información y Características - BioEnciclopedia*.
- Briyith, N., Caicedo, M., Alejandra, A., & Ibarra, R. (2017). Estado actual de los niveles de desperdicio de las cadenas de abastecimiento de alimentos. *Memorias de Congresos UTP*, 202–209.
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/1494/html%0Ahttps://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/1494>
- Carpio, C., Barragán, Á., Nuñez, G., Patiño, M., & Dangles, O. (2010). Un método cuantitativo para medir el área de tubérculo dañado por larvas de *Tecia solanivora* (Lep.; Gelechiidae) a través de análisis de imágenes digitales. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 31(1–2), 69–78. <https://doi.org/10.26807/remcb.v31i1-2.44>
- Carranza. (2017). *Papa (tubérculo) - EcuRed*.
- Cooper, W. D., & Helfrick, A. D. (2015). *Instrumentación Electrónica Moderna - Cooper*.
- Electrónica, P. I. (2015). *Proyecto educativo del programa*.
- FAO. (2008). *La papa, nutrición y alimentación - Año Internacional de la Papa 2008*.
- FAO. (2020). *Innovación en la FAO | FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*.
- Fedepapa. (2018). *COSTOS DE PRODUCCIÓN Volúmen 2/Número 3 Fecha: Junio de 2018 BOLETÍN MENSUAL REGIONAL*.
- Garces, C. (1948). Un Programa para el Mejoramiento de la Papa en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 8(32), 375–394.
- German, P. (2018). *La papa, el segundo alimento de los colombianos - ELESPECTADOR.COM*.
- Guerrero, R., Quintero, O., Andrés, M., Naranjo, P., Carlos, J., Foliar, Á., Semiprofesional, C., Guerrero, N. R., Andrés, M., Quintero, O., & Pérez, C. (2012). Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional Leaf Area Measurement in Photographs Taken with a Webcam, a Cell Phone or a Semi Professional Camera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 65(1), 6399–6405.

Guillen, J. (2012). *Sistema de monitoreo de parámetros agrícolas para la supervisión de cultivos de manera remota basado en redes de sensores inalámbricos.*

Gutiérrez-Soto, M. V., & Cadet-Piedra. (2011). Diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 397. <https://doi.org/10.15517/am.v22i2.11799>

Howeler, R. H. (1983). Análisis del tejido vegetal en el diagnóstico de problemas nutricionales algunos cultivos tropicales. In *Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.*

Martinez, C., National, G., & Pillars, H. (2020). *Caracterización del sistema productivo de papa en Nariño 2015-2020.*

Ovando, R. (2018). *Determinación fotogramétrica del área foliar de la planta de papa.*

Pinto, S., & Juez, G. (2017). Validación mediante el Método PPI de un Algoritmo Computacional para la medición automática del área de afectación por Sigatoka negra en imágenes de hojas de plátano del Departamento del Meta, Colombia. *Sistemas, Cibernética e Informática*, 14, 24–28.

Ramirez. (2019). *La Molina_Factura-ratas.pdf.*

Rodríguez, A., Carlos, A., Casa, D., Bressanini, L., Accietto, R., & Ovando, G. (2000). *Determinación del área foliar en papa (Solanum tuberosum L., var. Spunta) por medio de fotografías digitales conociendo la relación entre el número de píxeles y la altura de Determination of the leaf area in potato (Solanum tuberosum L., var. Spunt. 215–221.*

Rojas, J. (2020). *Plan de desarrollo departamento de Nariño.*

Sandborn, P. A., & Wilkinson, C. (2007). A maintenance planning and business case development model for the application of prognostics and health management (PHM) to electronic systems. *Microelectronics Reliability*, 47(12), 1889–1901. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2007.02.016>

Santos, M. (2010). *Evaluación del desarrollo, crecimiento y componentes de la papa.*

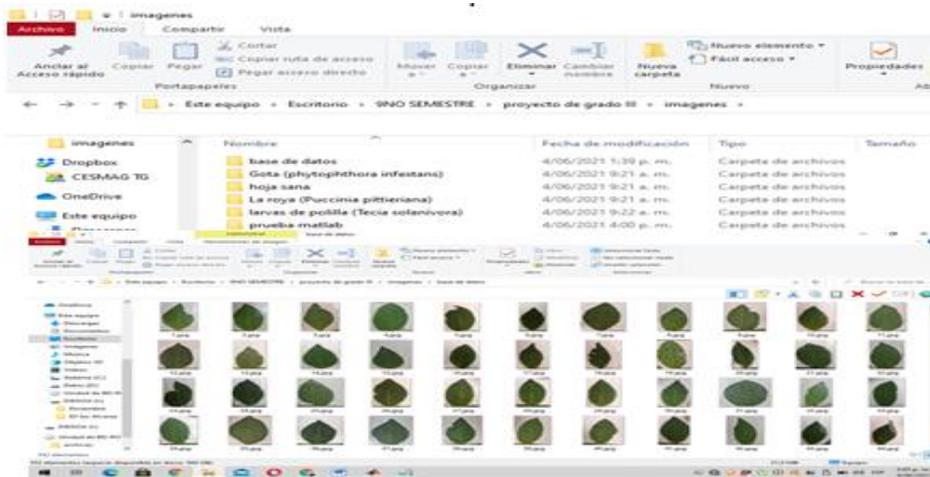
Vargas Jarquín, E. (2008). *Técnicas de procesamiento digital de imágenes e inteligencia artificial para diagnosticar y controlar la incidencia de la Sigatoka Negra (.*

Anexos

Anexo 1. Fotos del proceso de toma de imágenes



Anexo 2. Base de datos no paramétrica



Anexo 4. Base de datos de cuantificación y caracterización de imágenes y tubérculos

[..\Data\SMD-TP Bibliografía, metodología .xlsx](#)

Anexo 5. Código estación meteorológica

<https://github.com/DiegoA44/Estacion-meteorologica-.git>

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 7 de septiembre de 2022

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Investigación denominado: “*Sistema de monitoreo y diagnóstico no invasivo del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (Solanum tuberosum) mediante análisis de imágenes de indicadores fisiológicos externos*”, presentado por los autores Diego Alexander Asmaza Villacorte y Hernán Alejandro Culcha Cupacan del Programa Académico de Ingeniería electrónica al correo electrónico trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



DIEGO/JAIR RODRIGUEZ OBANDO
87067716
Ingeniería Electrónica
3168196929
rodriguez_jair@hotmail.com

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA Mineducación</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Hernán Alejandro Culcha Cupacan	Documento de identidad: 1087425205
Correo electrónico: Culchaalejandro36@gmail.com	Número de contacto: 3214455939
Nombres y apellidos del autor: Diego Alexander Asmaza Villacorte	Documento de identidad: 1087426128
Correo electrónico: diegoalexandera21@gmail.com	Número de contacto: 3187311068
Nombres y apellidos del asesor: Diego Jair Rodriguez Obando	Documento de identidad: 87067716
Correo electrónico: Rodriguez_jair@hotmail.com	Número de contacto: 3168196929
Título del trabajo de grado: Sistema de monitoreo y diagnóstico no invasivo del estado de salud del tubérculo de la planta de papa (<i>Solanum tuberosum</i>) mediante análisis de imágenes de indicadores fisiológicos externos.	
Facultad y Programa Académico: Facultad de Ingeniería - Ingeniería electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el termino en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve(mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje(mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA Mineducación</p>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

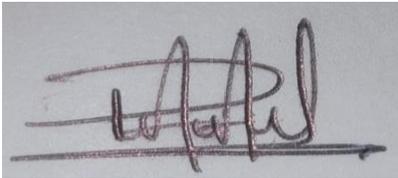
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndola indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 7 días del mes de Septiembre del año 2022

	
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor: Diego Alexander Asmaza Villacorte	Nombre del autor: Hernán Alejandro Culcha Cupacan
	
Firma del asesor	
Nombre del asesor: Diego Jair Rodriguez Obando	