

**Propuesta de un Sistema de Planificación de Demanda para la Cadena de Suministro de
Agricultores de Papa Pastusa en el Departamento de Boyacá**

Jhohan Mauricio Salas Villalba

**Asesor:
Wilson Bayardo Valcárcel Camejo**

Opción de grado

Universidad Santo Tomás

Facultad de ingeniería industrial

Tunja

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a todas aquellas personas que han encontrado en la educación un camino de superación personal, crecimiento intelectual y transformación social. A quienes, pese a las dificultades, limitaciones o dudas, han decidido apostar por el conocimiento como herramienta para ampliar sus horizontes, fortalecer su pensamiento crítico y construir un proyecto de vida con propósito y responsabilidad.

Esta tesis está especialmente dedicada a quienes conciben la educación no solo como un requisito académico, sino como un proceso continuo de aprendizaje que dignifica, empodera y genera oportunidades. A estudiantes, docentes, investigadores y profesionales que creen firmemente que el saber tiene la capacidad de cambiar realidades, cerrar brechas y aportar al desarrollo individual y colectivo.

Que este trabajo sea un reconocimiento al esfuerzo silencioso de quienes perseveran en su formación, convencidos de que cada logro académico representa no solo un avance personal, sino también un aporte al fortalecimiento de la sociedad. Asimismo, que sirva como motivación para quienes hoy inician su camino educativo y para aquellos que, aun con incertidumbre, deciden no renunciar a la búsqueda del conocimiento como medio de superación y progreso.

Agradecimientos

Dante, por su compañía silenciosa y constante a lo largo de este proceso académico. En los momentos de mayor exigencia y agotamiento, su presencia ofreció calma, serenidad y un espacio de quietud que permitió sostener la reflexión y el trabajo intelectual. En su mirada encontré paz cuando más la necesitaba.

Desde la cotidianidad compartida, acompañó las noches largas y los días exigentes, recordándome que el equilibrio emocional es también parte fundamental de la construcción del conocimiento. Su presencia fue un apoyo discreto, pero profundamente significativo, en este recorrido académico.

Néstor Avendaño, por escuchar incluso cuando el silencio decía más que las palabras, por intentar comprender en medio de la complejidad y por permanecer con paciencia cuando el tiempo y las circunstancias se tornaron inciertas. A su lado aprendí a guardar la calma y a reconocer que, aun en la duda, siempre es posible encontrar claridad.

Su presencia constante me enseñó a buscar el mejor camino dentro de la incertidumbre, a confiar en los procesos y a avanzar con serenidad cuando las respuestas no eran inmediatas. Su apoyo, comprensión y compañía transformaron este recorrido académico en una experiencia más humana y significativa. Por ello, con profunda gratitud, este logro no es solo mío: **este logro también te pertenece.**

A mi familia y amigos, por crear espacios y círculos seguros en mi entorno, brindándome apoyo, confianza y acompañamiento constante en cada etapa de este proceso. Su presencia hizo posible transitar este camino con mayor tranquilidad, recordándome que ningún logro se construye en

soledad, a mi mamá, por recordarme siempre que soy capaz de alcanzar todo aquello que me propongo, incluso en los momentos en que la duda intentó imponerse, su fortaleza, palabras y ejemplo fueron un sostén fundamental a lo largo de este recorrido académico, Morenito, por escuchar mis ideas sin juicio, incluso cuando parecían inusuales o difíciles de comprender. Su disposición para escuchar y acompañar permitió que muchas reflexiones encontraran espacio para madurar y tomar forma dentro de este proceso.

Al *hombre en la arena*, como símbolo de quien se atreve a actuar, a errar y a perseverar, incluso cuando el esfuerzo es visible y la crítica inevitable. Su discurso fue una fuente de inspiración constante durante este proceso, recordándome que el verdadero valor no reside en quien observa o señala desde la distancia, sino en quien se involucra, se expone y continúa avanzando a pesar del cansancio, la duda o el error.

Esta idea acompañó el desarrollo de este trabajo, reafirmando la importancia de asumir el compromiso con el propio esfuerzo, de reconocer que toda construcción académica implica intentos imperfectos, caídas y aprendizajes. En ese espíritu, este proceso se sostuvo en la convicción de que es preferible haberse atrevido, haber fallado y haber persistido, que no haberlo intentado nunca.

Contenido

Línea de Investigación	9
Introducción	9
Planteamiento del Problema	13
Contexto y Magnitud del Problema	13
Factores Causales y sus Implicaciones	¡Error! Marcador no definido.
Impactos Económicos, Sociales y Ambientales.....	16
Análisis de Experiencias y Soluciones Potenciales	17
Pregunta de investigación.....	18
Pregunta Principal.....	18
Preguntas Secundarias	18
Justificación.....	19
Desde la Perspectiva Social y Territorial	20
Desde la Perspectiva Ambiental y de Sostenibilidad	21
Desde una Perspectiva Académica y Disciplinar.....	21
Desde la Perspectiva Tecnológica y de Innovación	22
Desde la Perspectiva de Políticas Públicas.....	22
Desde el Punto de Vista de la Seguridad Alimentaria	23
Objetivos	24
Objetivo General.....	24
Objetivos Específicos	24
Alcance	25
Nivel de Investigación	25
Cobertura Geográfica.....	25
Objeto de Estudio.....	25
Profundidad del Análisis	26

Temporalidad	26
Población Objetivo	26
Marco Referencial	26
Evolución y Conceptualización de la Cadena de Suministro Agrícola	30
Planificación de la Demanda en el Contexto Agrícola	32
Métodos de Pronóstico de Demanda Aplicables al Sector Agrícola	35
Características de la Producción y Comercialización de Papa en Colombia	37
<i>Contexto productivo nacional y regional</i>	37
<i>Varietades comerciales y su importancia económica</i>	43
<i>Sistemas de comercialización y canales de distribución</i>	44
Tecnologías de Información y Comunicación en la Gestión de Cadenas Agroalimentarias	46
<i>Sistemas de apoyo a la decisión en el sector agrícola</i>	46
<i>Tendencias en digitalización de cadenas de suministro agrícolas</i>	48
Marco Metodológico	50
Definición del Tipo de Estudio y Diseño Metodológico	50
<i>Tipo de estudio</i>	50
<i>Diseño metodológico</i>	51
Población y Muestra	51
<i>Población</i>	55
<i>Muestra</i>	55
Técnicas e instrumentos de recolección de información	¡Error! Marcador no definido.
<i>Fuentes de información</i>	56
<i>Instrumentos de recolección</i>	56
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información	56
<i>Metodología de recolección analítica de datos</i>	56
<i>Instrumentos de extracción y procesamiento de datos</i>	57
<i>Variables de recolección</i>	58
<i>Protocolo de recolección y procesamiento</i>	59
<i>Herramientas tecnológicas para pronóstico de demanda</i>	60
Análisis de Datos	62
<i>Análisis estadístico descriptivo</i>	62

<i>Análisis de series temporales</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Modelamiento predictivo</i>	62
<i>Optimización de la cadena de suministro</i>	62
Consideraciones Éticas	63
<i>Marco ético para investigación con datos públicos</i>	63
<i>Principios éticos aplicados</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Aspectos éticos específicos para tesis de grado</i>	63
<i>Uso ético de datos públicos y tecnologías de información</i>	63
<i>Consideraciones éticas para el desarrollo tecnológico</i>	63
<i>Aprobación y seguimiento ético</i>	63
Espacios Académicos Aplicados al Proyecto y sus Aportes	64
<i>Gestión de la cadena de suministro</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Logística de distribución</i>	64
<i>Estadística industrial para el análisis de datos</i>	64
<i>Informática aplicada para el trabajo de bases de datos</i>	¡Error! Marcador no definido.
<i>Investigación de operaciones I y II - programación lineal</i>	65
<i>Lógica de programación para desarrollo de código</i>	65
Resultados Alcanzados	65
Análisis de resultados: Serie de Tiempo de Precios de Papa en Boyacá (2012–2025)	65
<i>Análisis comparativo de precios, dispersión y comportamiento estadístico por variedad y región (2012–2025)</i>	68
<i>Resultados comparados por variedad y línea general (2012–2025)</i>	80
Impacto Social	108
Conclusiones	112
Recomendaciones	114
Cronograma Detallado de Trabajo de Tesis	115
Bibliografía	116

Lista de Figuras

Figura 1	PIB agropecuario	p. 8
Figura 2	Departamentos productores	p. 12
Figura 3	Términos más frecuentes empleados en investigación sobre programación de la demanda agrícola	p. 26
Figura 4	Términos comunes indexados en bases de datos académicos sobre gestión de recursos agrícolas	p. 27
Figura 5	Distribución de los documentos analizados según su categoría	p. 28
Figura 6	Mapa de correlación de términos en artículos sobre planificación de la demanda agrícola	p. 29
Figura 7	Revistas científicas más destacadas sobre planificación de demanda agrícola y sostenibilidad en cadenas de suministro	p. 31
Figura 8	Frecuencia anual de publicaciones académicas sobre planificación de demanda y agricultura (1995–2025)	p. 32
Figura 9	Costo de producción por hectárea en 2024	p. 38
Figura 10	Variación mensual de los costos de producción	p. 40
Figura 11	Participación por eslabón en los costos de producción	p. 41
Figura 12	Nube de términos en investigaciones académicas sobre planificación de demanda agrícola y tecnologías	p. 48
Figura 13	Proceso para identificación y validación de un modelo ARIMA	p. 61
Figura 14	Serie de tiempo del precio de la papa en Boyacá (2012–2025)	p. 66
Figura 15	Precios históricos de papa en principales ciudades productoras de Boyacá	p. 69
Figura 16	Matriz de correlación de Pearson entre precios de variedades de papa en Boyacá	p. 75
Figura 17	Serie de tiempo del precio de papa por variedad en Boyacá (2012–2025)	p. 78
Figura 18	Serie de precios de papa por variedad (ICA Única, Tuquerreña, Superior y Betina) y tendencia general	p. 81
Figura 19	Resultados del modelo SARIMAX	p. 86
Figura 20	Diagnósticos de residuos del modelo SARIMAX (2,1,1)	p. 91
Figura 21	Serie de residuales estandarizados	p. 92
Figura 22	Histograma y densidad estimada de los residuales	p. 93
Figura 23	Gráfico normal Q–Q	p. 94
Figura 24	Correlograma (ACF)	p. 94
Figura 25	Ajuste del modelo final	p. 96
Figura 26	Ajuste del modelo final (Precio)	p. 98
Figura 27	Ajuste del modelo final (Trend)	p. 99
Figura 28	Ajuste del modelo final (Seasonal)	p. 100
Figura 29	Ajuste del modelo final (Resid)	p. 101
Figura 30	Pronóstico del precio	p. 103

Propuesta de un Sistema de Planificación de Demanda para la Cadena de Suministro de Agricultores de Papa Pastusa en el Departamento de Boyacá

Línea de Investigación

Propuesta de un sistema de planificación de demanda para la cadena de suministro de agricultores de distintas variedades papa cultivada en el departamento de Boyacá

El presente estudio se centra en la optimización de la planificación de la demanda en la cadena de suministro agroindustrial, con un enfoque particular en la producción variedades de papa cultivadas en Boyacá, Colombia. El enfoque de esta optimización es reducir costos y mejorar la rentabilidad de los agricultores locales a través de modelos avanzados de pronóstico de demanda, la planificación de la demanda es fundamental en la cadena de suministro, ya que permite anticipar el comportamiento del mercado y ajustar la producción, evitando así problemas como el desabastecimiento o el exceso de inventario, (Valentina & Rojas, n.d.), En el caso de la papa cultivada en el departamento en mención, la naturaleza perecedera del producto y las variaciones estacionales en su producción exigen la aplicación de técnicas avanzadas de pronóstico, para abordar estas problemáticas, se utilizarán herramientas de investigación de operaciones y modelado matemático.

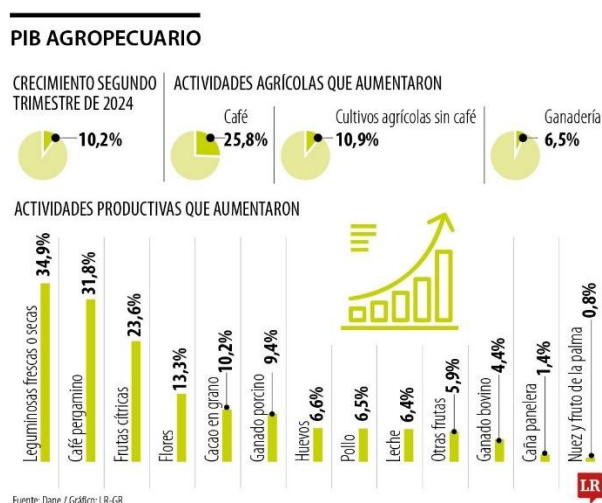
La integración de estos modelos en sistemas de información facilitará la toma de decisiones, mejorando así la gestión de la producción. Este enfoque impactará positivamente en la sostenibilidad de la cadena de suministro de los agricultores de papa pastusa en Boyacá.

Introducción

La agricultura ha sido, a lo largo de la historia, uno de los sectores más importantes en la economía de Colombia, no solo por su aporte al producto interno bruto agropecuario, sino también por su función clave en la seguridad alimentaria y el desarrollo regional.

Figura 1

PIB Agropecuario



Nota. Evolución del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agropecuario en Colombia durante 2023–2024. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024)

La agricultura es uno de los fundamentos económicos y sociales de Colombia, donde el cultivo de papa tiene un papel especialmente destacado, tanto por su contribución al producto interno bruto del sector agropecuario como por su relevancia en la seguridad alimentaria y la creación de empleo en áreas rurales. De acuerdo con datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2023), En Boyacá, la papa es un elemento crucial del patrimonio productivo y cultural, apoyando la economía de miles de familias campesinas que dependen de este cultivo para su sustento principal. Esta importancia está relacionada con su alta demanda, su función como un alimento básico y su presencia histórica en la región andina, donde la papa se ha

convertido en un cultivo esencial para la economía local ,(Velez Felipe, 2020). sin embargo, a pesar de su significancia económica y social, el sector de la papa enfrenta crecientes dificultades vinculadas a la variabilidad del clima, la excesiva intermediación, la carencia de estándares de calidad y la inestabilidad de los precios, factores que provocan ineficiencias en la cadena de suministro y disminuyen la rentabilidad de los agricultores,(Lambert & Enz, 2018).

Estos problemas son más graves debido a la escasa implementación de técnicas modernas de planificación y la continua utilización de métodos tradicionales que complican la mejora de procesos como la recolección, el almacenamiento, el transporte y la comercialización. Muchas veces, los agricultores operan con limitaciones tecnológicas y tienen poca capacidad para prever cambios en la demanda, lo que resulta en importantes pérdidas después de la cosecha, bajos márgenes de ganancia y una fuerte dependencia de intermediarios, (Palacio Germán, 2023).

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, alrededor del 30% de la producción nacional de papa sufre pérdidas post-cosecha por problemas logísticos, falta de capacidad de almacenamiento y descoordinación entre la oferta y la demanda (La Papa: El alimento de la canasta básica colombiana..., n. d.). La situación es especialmente alarmante considerando que más del 95% de los hogares consumen papa, con un consumo per cápita que alcanzó cerca de 55 kg en 2022 (La Papa: El alimento de la canasta básica colombiana..., n. d.). Adicionalmente, el cultivo representa el 1,4% del PIB agrícola y genera alrededor de 264. 000 puestos de trabajo directos e indirectos, lo que refleja su influencia económica y social (Sala de Prensa – La reconversión productiva de la papa colombiana. , n. d.). Por lo tanto, la pérdida de disponibilidad o la disminución de la calidad del producto no solo representa un riesgo financiero

para el agricultor, sino que también pone en peligro la seguridad alimentaria de amplios sectores de la población.

Frente a esta situación, las cadenas de suministro en el ámbito agrícola necesitan métodos más avanzados y completos que fusionen el saber tradicional con recursos tecnológicos y logísticos que cumplan con las demandas actuales del mercado. La adopción de sistemas para planificar la demanda ha mostrado ser efectiva al mejorar la operatividad, prever las necesidades del mercado y disminuir el desperdicio, facilitando una mejor coordinación entre los participantes de la cadena productiva. Desde el punto de vista de la ingeniería industrial, este proceso de optimización implica la combinación de modelos de predicción, herramientas para ayudar en la toma de decisiones y también metodologías de investigación operativa adaptadas a las necesidades específicas del sector agrícola. La implementación de estas técnicas ha resultado en aumentos de rentabilidad de hasta un 25% y en reducciones de más del 15% en pérdidas posteriores a la cosecha, aunque su correcta aplicación considera factores socioculturales, niveles educativos, infraestructura local y dinámicas de colaboración de las comunidades rurales.

En este contexto, el objetivo de este estudio es diseñar un sistema de planificación de demanda que se ajuste a las circunstancias de los cultivadores de papa pastusa en Boyacá. Para lograr esto, se sugiere un enfoque que combina la ingeniería industrial con el análisis territorial, integrando modelos cuantitativos de predicción, evaluación de patrones históricos de producción y precios. La relevancia de estas medidas depende de su capacidad para adaptarse a las realidades locales, de la participación activa de los agricultores y de la alineación con políticas públicas y programas de desarrollo rural. Así, la investigación pretende ofrecer una herramienta

técnica que ayude a aumentar la competitividad del sector de la papa, fortalecer la sostenibilidad del sistema agroalimentario y apoyar el desarrollo territorial en un entorno económico que es cada vez más desafiante y globalizado.

Planteamiento del Problema

Dentro del sector agrícola colombiano, y en particular el subsector de la papa enfrenta desafíos significativos relacionados con la planificación de la demanda, en el departamento de Boyacá, que se destaca como uno de los principales productores de papa pastusa en el país, surgen problemáticas críticas, tales como considerables pérdidas post-cosecha y la falta de un análisis de la demanda.

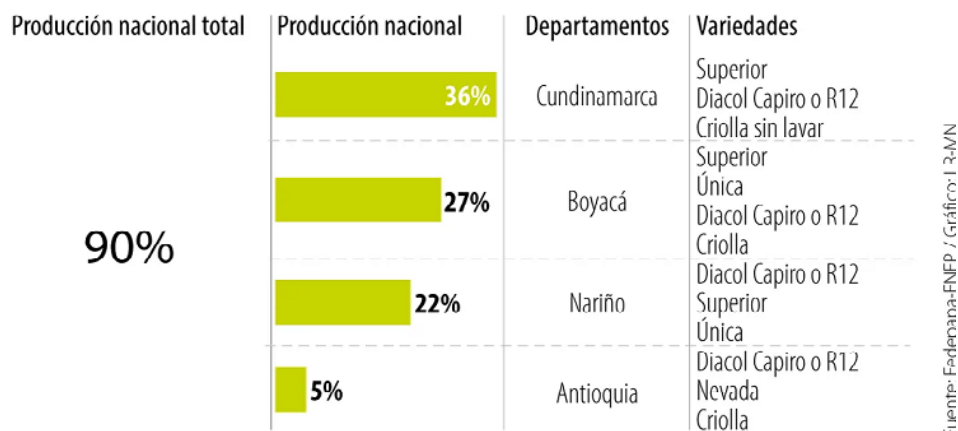
Contexto y Magnitud del Problema

Boyacá se posiciona como el segundo productor de papa a nivel nacional, contribuyendo con alrededor del 27.3% de la producción total del país. Con una superficie cultivada que abarca 33,700 hectáreas, la producción anual se aproxima a las 765,000 toneladas, (Juan Carlos Avellaneda Micolta, 2023).

Figura 2

Departamentos productores

DEPARTAMENTOS PRODUCTORES DE PAPA EN COLOMBIA



Nota. Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia, representan 90% de la producción de papa.

Fuente: Fedepapa & Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (s.f.). *Datos sobre la producción de papa en Colombia*. Federación Colombiana de Productores de Papa / UPRA.

El cultivo de papa es una actividad económica clave en Boyacá; no obstante, su red de abastecimiento presenta numerosas ineficiencias que ponen en peligro la rentabilidad, la estabilidad de ingresos y la sostenibilidad del sistema productivo. Varios estudios indican que los costos de logística representan entre el 35% y el 42% del precio final del producto, (Leiva, 1998b), superando considerablemente el promedio nacional agrícola, que se estima en un 25%. Esta situación impacta principalmente a los pequeños agricultores, quienes constituyen alrededor del 85% del total de campesinos en la región, (Palacio Germán, 2023)

A pesar de las múltiples problemáticas relacionadas como los retos de transporte en áreas montañosas, los problemas mecánicos de los vehículos, los altos costos de traslado, las pérdidas postcosecha que varían entre el 18% y el 25% (Chaparro Segundo, 2019), y la falta de infraestructura para el acopio estas no son independientes: provienen de una causa común que agrava todas las ineficiencias de la cadena.

El principal problema que vincula estas dificultades es la carencia de un análisis formal de la demanda, un elemento crucial para la planificación y la toma de decisiones en cualquier red de suministro. Los estudios indican que el 91.3% de los productores de papa en Boyacá basa sus decisiones únicamente en la experiencia personal o en datos informales del mercado, sin recurrir a métodos estructurados de previsión ni a herramientas tecnológicas que les permitan anticipar las condiciones futuras (Ramírez-Gómez y Sánchez-Gómez, 2025). Esta falta de planificación provoca ciclos de exceso y escasez, resultando en fluctuaciones drásticas de precios. Según Gómez y Pérez (2023), estas fluctuaciones pueden llegar hasta un 175% en períodos tan cortos como tres meses, un nivel de inestabilidad que supera con creces el de departamentos como Cundinamarca (120%) o Nariño (105%). Esta volatilidad dificulta la proyección de ingresos, restringe la capacidad para invertir en nuevas tecnologías y aumenta la dependencia de intermediarios.

La concentración estacional de la cosecha agrava la situación: cerca del 65% de la papa pastusa se recoge entre abril y julio (Palacio Germán, 2023; Corpus Arrieta, 2023), lo que provoca una saturación del mercado, una caída drástica en los precios y pérdidas económicas considerables. Al mismo tiempo, la escasa infraestructura de almacenamiento solamente el 7.2% de la producción se procesa en instalaciones adecuadas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, n. d.) y las deficiencias en las vías rurales incrementan los costos logísticos y afectan la calidad del producto transportado (Ortega Arango, 2018; Sebastián y Grisales, 2018). Aunque estos elementos son importantes, la evidencia muestra que la raíz del

problema no se limita a la logística, sino que es resultado de la falta de coordinación provocada por la ausencia de información precisa y actualizada sobre la demanda.

La relación entre la falta de análisis de la demanda y las ineficiencias en la cadena de suministro es clara: sin previsiones, los agricultores no tienen la capacidad de planear correctamente sus siembras, calcular la producción esperada, organizar el transporte, evaluar sus necesidades de almacenamiento ni negociar precios con mayor ventaja en el mercado. La ausencia de estas herramientas lleva a decisiones reactivas, a una producción desequilibrada y a pérdidas posteriores a la cosecha que no solo se deben a problemas operativos, sino también a deficiencias en la planificación del sistema agroalimentario en su totalidad. Según lo indicado por Rodríguez Alexander en 2023, el uso de modelos cuantitativos para el pronóstico puede disminuir los errores de estimación del 38% a menos del 15%, lo que resalta que tener información y capacidad analítica es clave para mejorar la eficiencia.

Por lo tanto, aunque la cadena de suministro de papa en Boyacá enfrenta varios desafíos, el principal obstáculo que impide su mejora es la falta de un sistema de planificación de la demanda que permita prever los comportamientos del mercado, coordinar de manera efectiva las actividades productivas y minimizar la volatilidad y las pérdidas. Abordar este inconveniente no solo ayudaría a reducir los costos logísticos, sino que también aumentaría la competitividad, mejoraría los ingresos de los agricultores y fomentaría un sistema más eficiente y sostenible acorde con las exigencias actuales del mercado.

Impactos Económicos, Sociales y Ambientales

Estas ineficiencias no solo afectan el ámbito económico, sino que generan una serie de consecuencias negativas en diversos aspectos. En el aspecto económico, Ramírez y Gómez (2022) estiman que los pequeños productores de papa en Boyacá pierden anualmente entre un 25% y un 32% de sus ingresos potenciales debido a factores como pérdidas en la post-cosecha y precios deprimidos por una oferta no planificada. A su vez, el "Análisis de riesgo financiero para el sector de la papa en Boyacá" (Pulido Maria, 2006) señala que el 43.2% de estos productores opera con márgenes netos negativos o casi nulos, lo que pone en riesgo su sostenibilidad financiera y su capacidad para invertir en mejoras tecnológicas, en el ámbito social, esta situación ha fomentado la migración rural y el abandono progresivo de la actividad agrícola. De acuerdo con el "Análisis de la cadena de valor de la papa cultivada en Boyacá" (Corpus Arrieta, 2019), la población dedicada a la producción de papa en el departamento ha decrecido un 17.3% en la última década, con un impacto especial en los jóvenes rurales que buscan oportunidades económicas en las ciudades.

Análisis de Experiencias y Soluciones Potenciales

La problemática aquí expuesta no es exclusiva de Boyacá ni de Colombia; otros contextos han implementado soluciones que podrían ser adaptadas a la realidad local. Por ejemplo, el estudio "A decision support system for agricultural supply chain planning under uncertainty" (Tsolakis et al., 2018), documenta cómo la adopción de sistemas de planificación integrados en regiones productoras de papa en Perú logró reducir las pérdidas post-cosecha en un 17% en un periodo de tres años, además, iniciativas locales como el "Plan estratégico de recolección, empaque y distribución de papa y cebolla junca de Boyacá a Bogotá" (Granados

Alejandra, 2003) han mostrado resultados alentadores a escala piloto, con reducciones del 8% en pérdidas post-cosecha, gracias a la implementación de centros de consolidación.

Pregunta de investigación

Pregunta Principal

¿Cómo se puede diseñar un sistema integrado de planificación de demanda que contribuya a la reducción de las pérdidas post-cosecha en la cadena de suministro de los agricultores de papa en sus diferentes variedades en el departamento de Boyacá?

Preguntas Secundarias

1. ¿Cuáles son las principales ineficiencias presentes en los procesos actuales de planificación de demanda que afectan a los agricultores de papa en Boyacá?

2. ¿Qué metodologías de pronóstico de demanda resultarían más adecuadas para el contexto socioeconómico y productivo de estos agricultores boyacenses?

3. ¿Qué factores tecnológicos, organizacionales y culturales deben tenerse en cuenta para asegurar la viabilidad y sostenibilidad de un sistema de planificación dentro de la cadena de suministro de papa en la región?

4. ¿Qué impacto económico, social y ambiental podría generarse con la implementación de un sistema integrado de planificación de demanda en la cadena de suministro de los agricultores de papa en Boyacá?

Justificación

La investigación se centra en la propuesta de diseño de un sistema integrado de planificación de demanda para los agricultores de papa pastusa en Boyacá, este estudio se basa en diversas dimensiones que abarcan aspectos económicos, sociales, ambientales, académicos y tecnológicos. A continuación, se detallan los elementos que justifican la pertinencia y relevancia de esta labor en el contexto actual.

El sector papero es un pilar fundamental en la economía agrícola de Boyacá, contribuyendo significativamente al PIB departamental con un 18.3% dentro del subsector agrícola, (*BOLETÍN REGIONAL: BOYACÁ Boletín Regional BOYACÁ 2023*, n.d.). Sin embargo, su potencial de desarrollo está limitado por ineficiencias estructurales en la cadena de suministro. Optimizar los procesos logísticos representa una oportunidad estratégica para mejorar la competitividad de este sector, que es particularmente vulnerable a las fluctuaciones del mercado, con la creciente apertura comercial que enfrenta Colombia, los productores nacionales de papa se ven en desventaja ante importaciones provenientes de países con cadenas de suministro altamente tecnificadas. Por tanto, fortalecer las capacidades logísticas de los agricultores boyacenses no solo es una oportunidad de mejora, sino una necesidad imperiosa para asegurar la

viabilidad económica del sector a mediano y largo plazo, los recursos limitados de los pequeños y medianos productores requieren soluciones que maximicen su eficiencia operativa. El desarrollo de un sistema de planificación adaptado a sus condiciones particulares permitiría una asignación más efectiva de estos recursos escasos, potenciando su capacidad productiva sin necesidad de realizar grandes inversiones en infraestructura.

Desde la Perspectiva Social y Territorial

La producción de papa en Boyacá va más allá del ámbito económico; se convierte en un elemento fundamental de identidad y cultura para las comunidades rurales. Sin embargo, estas comunidades actualmente enfrentan procesos de despoblamiento y envejecimiento que amenazan la continuidad generacional de la actividad agrícola. Mejorar la rentabilidad del cultivo, mediante sistemas de planificación más eficientes, contribuiría a retener a la población joven en el territorio y fortalecer el tejido social rural, adicional, las diferencias de poder presentes en la cadena de comercialización (Negociación) actual llevan a una distribución desigual de la rentabilidad generada, concentrando los beneficios en intermediarios y dejando a los productores primarios en una posición vulnerable, un sistema que optimice su capacidad de planificación comercial podría reequilibrar estas relaciones de poder, favoreciendo una distribución más justa de los beneficios.

La investigación propone un enfoque participativo que valora y articula el conocimiento tradicional con herramientas de modelación técnicas modernas, reconociendo la importancia de la sostenibilidad sociocultural en cualquier proceso de innovación tecnológica en contextos

rurales, este enfoque contribuye al empoderamiento de las comunidades, permitiéndoles convertirse en agentes activos en la transformación de sus sistemas productivos.

Desde la Perspectiva Ambiental y de Sostenibilidad

Minimizar las pérdidas post-cosecha permite un uso más eficiente de los recursos naturales, como el agua, el suelo y la energía, que son parte integral del proceso productivo. Ante la creciente presión sobre los ecosistemas altoandinos, es fundamental aumentar la producción manteniendo la misma base de recursos naturales, en aras de alcanzar un desarrollo sostenible, el desarrollo de sistemas de planificación resilientes que respondan a la variabilidad climática cobra especial importancia, ya que el 92% de los cultivos de papa en Boyacá son de secano, lo que los hace particularmente susceptibles a fenómenos meteorológicos extremos, cuya frecuencia e intensidad han aumentado en los últimos años (Novoa Julio, 2020).

Desde una Perspectiva Académica y Disciplinar

Esta investigación se erige como un valioso caso de estudio para aplicar metodologías avanzadas de investigación de operaciones en contextos rurales, que históricamente han estado alejados de estas herramientas. Este trabajo contribuye a reducir la brecha entre el desarrollo teórico de la disciplina y su aplicación práctica en entornos productivos específicos del país, la adaptación de modelos de pronóstico de demanda a las particularidades geográficas, infraestructurales y socioeconómicas de Boyacá representa un aporte significativo a la literatura especializada, que tradicionalmente ha enfocado sus aplicaciones en contextos urbanos o industriales con condiciones muy distintas a las del territorio en estudio, este esfuerzo se enmarca en la tendencia global hacia la agricultura 4.0, caracterizada por la integración de

tecnologías de la información y métodos avanzados de análisis de datos en los procesos agrícolas. La investigación avanza en la comprensión de cómo estas tendencias pueden implementarse en contextos de agricultura familiar andina, un tema poco explorado en la literatura existente.

Desde la Perspectiva Tecnológica y de Innovación

Esta investigación propone un enfoque innovador que busca democratizar el acceso a herramientas avanzadas de planificación, que hasta ahora solo estaban al alcance de grandes empresas con capacidad de inversión en tecnologías costosas. El diseño de soluciones asequibles y adaptadas a las capacidades reales de los pequeños productores constituye una relevante innovación social, el creciente acceso a dispositivos móviles e internet en áreas rurales de Boyacá, que alcanzó un 67% en 2023 según MinTIC, abre oportunidades sin precedentes para la implementación de sistemas digitales de apoyo a la toma de decisiones, los cuales pueden transformar los procesos de planificación logística en la región, la articulación de esta propuesta con iniciativas institucionales como "Agro 4. 0" del Ministerio de Agricultura y "Colombia Rural Digital" del MinTIC fortalece las posibilidades de implementar y escalar los resultados obtenidos, maximizando así su impacto potencial.

Desde la Perspectiva de Políticas Públicas

Esta investigación se alinea con los objetivos del Plan Departamental de Desarrollo de Boyacá 2020-2023, titulado "Pacto Social por Boyacá: Tierra que Sigue Avanzando". En particular, se conecta con la línea estratégica "Desarrollo Agroindustrial", que prioriza la

modernización de las cadenas productivas tradicionales a través de la incorporación de tecnología y la mejora de procesos logísticos, la región central de Colombia, donde se encuentra Boyacá, ha sido reconocida como prioritaria en la Política Nacional Logística (CONPES 3982) debido a su relevancia estratégica en el abastecimiento alimentario. La optimización de los procesos logísticos en la cadena de suministro de la papa es fundamental para alcanzar los objetivos de esta política.

Desde el Punto de Vista de la Seguridad Alimentaria

La papa es un alimento esencial en la dieta colombiana, con un consumo per cápita anual de 62.4 kg (Palacio Germán, 2023). Mejorar su cadena de suministro impacta directamente en la disponibilidad, el acceso y la estabilidad de este producto básico, componentes clave para garantizar la seguridad alimentaria, la disminución de las pérdidas post-cosecha permite aumentar de manera efectiva la oferta alimentaria sin necesidad de extender la frontera agrícola, lo cual se alinea con los objetivos de la Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (CONPES 113), en un contexto de creciente vulnerabilidad alimentaria, acentuada por factores como el cambio climático y la inestabilidad económica, es prioritaria la creación de cadenas de abastecimiento cortas y eficientes para asegurar el derecho a la alimentación de la población.

La relevancia de esta investigación radica en su capacidad para generar impactos multidimensionales, al integrar mejoras técnicas en los procesos logísticos con beneficios económicos, sociales, ambientales e institucionales. La propuesta responde a necesidades claramente identificadas en el sector de la papa en Boyacá y se alinea con los marcos estratégicos

de desarrollo territorial, constituyendo así un aporte significativo tanto para el ámbito académico como para la transformación productiva de la región, a nivel nacional, este trabajo contribuye a los objetivos del "Plan Nacional para la Transformación Digital del Sector Agropecuario, que tiene como finalidad cerrar las brechas de productividad mediante la incorporación de tecnologías de información en todos los eslabones de las cadenas agroalimentarias, (Lineamientos de Política Pública Para La Promoción de La Agrotecnología Subdirección de Producción y Desarrollo Rural Dirección de Desarrollo Rural Sostenible (DDRS) Departamento Nacional de Planeación (DNP), n.d.).

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar y presentar un sistema para la planificación de la producción agrícola que se base en las proyecciones de precios de la papa en Boyacá, empleando modelos estadísticos autoregresivos, que permita a los agricultores realizar elecciones conscientes respecto a la siembra, recolección y venta.

Objetivos Específicos

Diagnosticar las principales restricciones en los métodos actuales de planificación de la producción y venta de papa en Boyacá, reconociendo los elementos que provocan inseguridad en las decisiones de los agricultores.

Elaborar un modelo de predicción de demanda que sea capaz de calcular los precios futuros de la papa, teniendo en cuenta variables del pasado, estacionales y del mercado, que sean relevantes para el área regional.

Analizar la fiabilidad y aplicabilidad del modelo de predicción en la organización de la producción agrícola, evaluando su posible impacto en la disminución de pérdidas económicas y en la estabilidad de los ingresos de los productores.

Crear lineamientos para la implementación de un sistema de planificación basado en los precios previos, que facilite la adopción de nuevas tecnologías por parte de los agricultores y fomente su inclusión en el proceso de toma de decisiones productivas.

Alcance

Nivel de Investigación

Este estudio se llevará a cabo de manera descriptiva y propositiva, centrando su atención en el diseño conceptual de un sistema de planificación, sin llegar a realizar una implementación completa.

Cobertura Geográfica

La investigación se enfocará exclusivamente en el departamento de Boyacá, poniendo especial énfasis en los principales municipios productores de papa que se encuentran en el corredor industrial de la región.

Objeto de Estudio

El análisis se centrará en la cadena de suministro de la papa (Pastusa Suprema, Diacol Capiro, Papa Tuquerreña, Criolla Limpia, Criolla sin Lavar, ICA Única, Superior e ICA Puracé.), abarcando desde su producción agrícola hasta su distribución en los mercados mayoristas.

Profundidad del Análisis

Se llevará a cabo un diagnóstico de la situación actual, junto con el diseño de la propuesta del sistema, llegando hasta la fase de modelado conceptual y validación teórica.

Temporalidad

El análisis de datos considerará información de los últimos trece años (2012-2025), y la propuesta se desarrollará con miras a un horizonte de implementación a corto y mediano plazo.

Población Objetivo

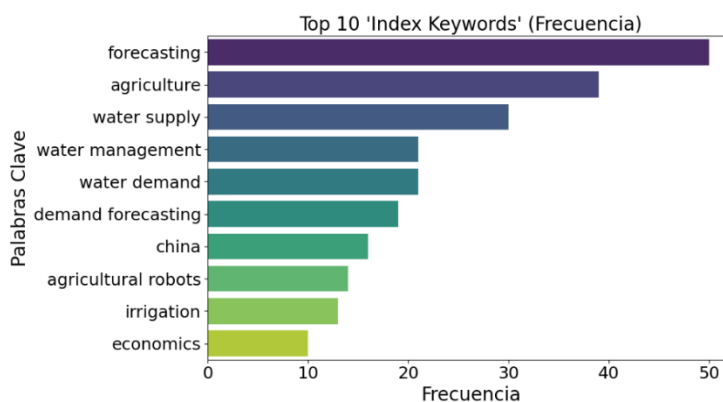
La propuesta se dirigirá específicamente a pequeños y medianos productores de papa pastusa en Boyacá, quienes constituyen el 85% del sector.

Marco Referencial

La Figura 1 ilustra las diez palabras más frecuentes en estudios académicos sobre la previsión de la demanda en la agricultura. Se nota una notable predominancia de términos tales como pronóstico de demanda, agricultura, aprendizaje automático y gestión de la cadena de suministro, lo que indica una unión entre métodos avanzados de predicción y su uso en cadenas de producción agrícola. Este estudio bibliométrico valida la relevancia del enfoque que se ha tomado en esta investigación, conectándolo con las tendencias internacionales en innovación tecnológica para el ámbito agrícola, (Figura 3).

Figura 3

Términos más frecuentemente empleados en investigaciones sobre programación de la demanda agrícola



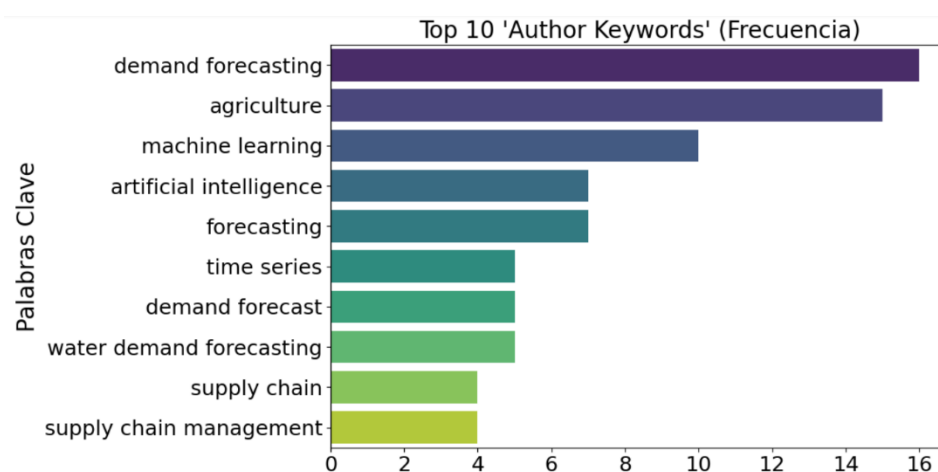
Nota. La figura muestra los términos más frecuentemente usados por los autores en los documentos revisados, lo que demuestra la importancia creciente del enfoque empleado en este estudio.

En el contexto de la revisión literaria efectuada, se realizó un análisis bibliométrico de artículos académicos recientes vinculados a la planificación de la demanda en la agricultura. Este estudio buscó detectar las tendencias actuales en la investigación, los temas más comunes y las nuevas tecnologías emergentes. A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron a

partir de las palabras clave empleadas por los autores y las que están indexadas en bases de datos científicas, lo que resalta la importancia del enfoque utilizado en esta tesis, se evidencia en la (Figura 4).

Figura 4

Términos comunes indexados en bases de datos académicos sobre gestión de recursos agrícolas

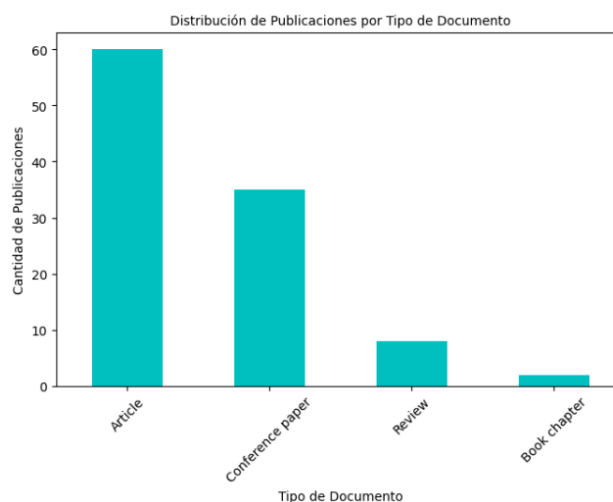


Nota. La figura muestra los términos más comunes indexados en bases de datos académicas en estudios relacionados con la gestión de recursos agrícolas. Se resalta la importancia de la palabra forecasting, seguida de ideas como agriculture, water supply y demand forecasting, lo que confirma la relevancia del análisis predictivo en la administración de cadenas de suministro agroalimentarias. Esta información bibliométrica subraya la importancia del tema que aborda este estudio y su conexión con áreas de investigación reconocidas globalmente en sostenibilidad y eficiencia en el ámbito agrícola.

Para llevar a cabo el análisis bibliométrico, se organizó la documentación conforme a su categoría. Esta actividad facilita la demostración de la robustez científica de las fuentes, subrayando la predominancia de los artículos académicos evaluados por expertos, lo que otorga mayor validez y credibilidad a la información empleada como fundamento conceptual en este estudio (Figura 5).

Figura 5

Distribución de los documentos analizados según su categoría

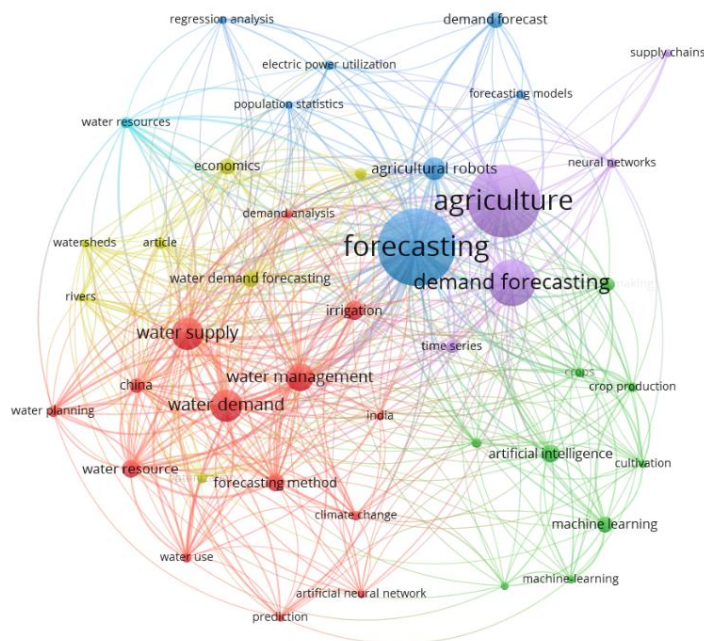


Nota. La mayoría de los documentos analizados según su categoría. La mayoría son artículos de investigación, seguidos de presentaciones en conferencias y revisiones exhaustivas.

Para representar las conexiones entre los asuntos más explorados, se elaboró un diagrama de co-ocurrencia de palabras clave. Este gráfico facilita el reconocimiento de núcleos conceptuales y relaciones temáticas entre términos significativos, ilustrando cómo se organizan los conceptos alrededor de temas como pronósticos, agricultura, aprendizaje automático y gestión del agua. Esta disposición resalta la naturaleza multidisciplinaria del enfoque y apoya la incorporación de estas dimensiones en la investigación actual, (Figura 6).

Figura 6

Mapa de correlación de términos en artículos sobre la planificación de la demanda agrícola.



Nota. Se pueden identificar grupos temáticos relacionados, centrándose en la previsión, la agricultura, la inteligencia artificial y la administración del agua.

Evolución y Conceptualización de la Cadena de Suministro Agrícola

La cadena de suministro agrícola ha sufrido una transformación notable en las últimas décadas, evolucionando de modelos convencionales a sistemas más complejos y tecnológicos. De acuerdo con (Aramyan et al., 2006), la cadena de suministro agrícola se puede describir como "un conjunto de actividades interrelacionadas que abarcan la planificación, la coordinación y el control del traslado de productos desde el productor inicial hasta el consumidor final". Esta descripción enfatiza la naturaleza interconectada y dependiente de los procesos que intervienen

en la creación y distribución de alimentos, (Beamon, 1998), subraya tres rasgos esenciales que distinguen las cadenas de suministro agrícola de otros tipos de cadenas logísticas: la perecibilidad del producto, la variabilidad climática como elemento clave de la producción, y la estacionalidad que acompaña a los ciclos de cultivo. Estas características crean retos particulares en términos de planificación y gestión que no se presentan en otros sectores industriales, el desarrollo conceptual de estas cadenas ha estado caracterizado por un cambio de enfoques aislados a visiones más integradas. Como indican (Van Der Vorst et al., 2009), "las cadenas de suministro agrícolas actuales han pasado de sistemas desconectados a redes colaborativas en las que la circulación de información es tan crucial como la circulación de productos". Este cambio ha sido impulsado por factores como la globalización de los mercados alimentarios, las crecientes demandas de calidad de los consumidores y la mayor conciencia sobre la sostenibilidad de los sistemas de producción.

En el caso particular de Colombia, (Jacobo et al., 2021), señala cinco fases en la evolución de las cadenas agroalimentarias:

1. Producción de subsistencia (hasta 1950).
2. Modernización temprana (1950-1980).
3. Pertura y ajuste (1980-2000).
4. Especialización regional (2000-2015).
5. Digitalización y sostenibilidad (2015-presente).

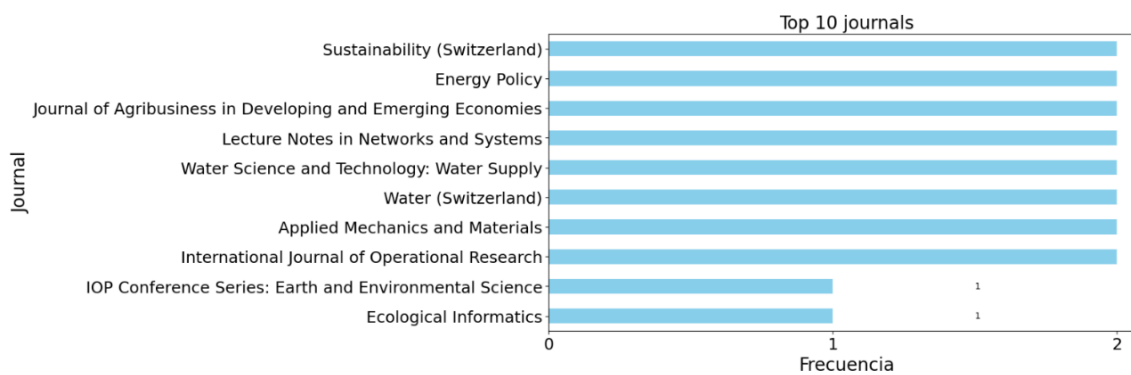
Esta clasificación temporal ayuda a comprender las transformaciones estructurales que han sufrido los sistemas de producción y distribución de alimentos en el país, incluido el sector de la papa.

Planificación de la Demanda en el Contexto Agrícola

La planificación de la demanda es un elemento clave en la administración de las cadenas de suministro en la agricultura. Según (Christopher & Peck, 2004), este procedimiento implica "la proyección sistemática de las necesidades futuras del mercado para guiar las decisiones sobre producción, inventario y distribución". En el sector agrícola, este tipo de planificación se complica debido a la naturaleza biológica de la producción y las variaciones inherentes en los mercados alimentarios, además de examinar los temas más destacados en la literatura, se reconocieron las revistas científicas más influyentes que han apoyado el avance académico en planificación de demanda, agricultura inteligente y logística agroalimentaria. La figura siguiente ofrece un resumen de los journals más comunes, lo que permite mostrar la fortaleza y diversidad de la producción científica relacionada con el asunto, se puede evidenciar en la (Figura 7).

Figura 7

Revistas científicas más destacadas donde se agrupa la investigación importante acerca de la planificación de la demanda agrícola y la sostenibilidad en las cadenas de suministro.

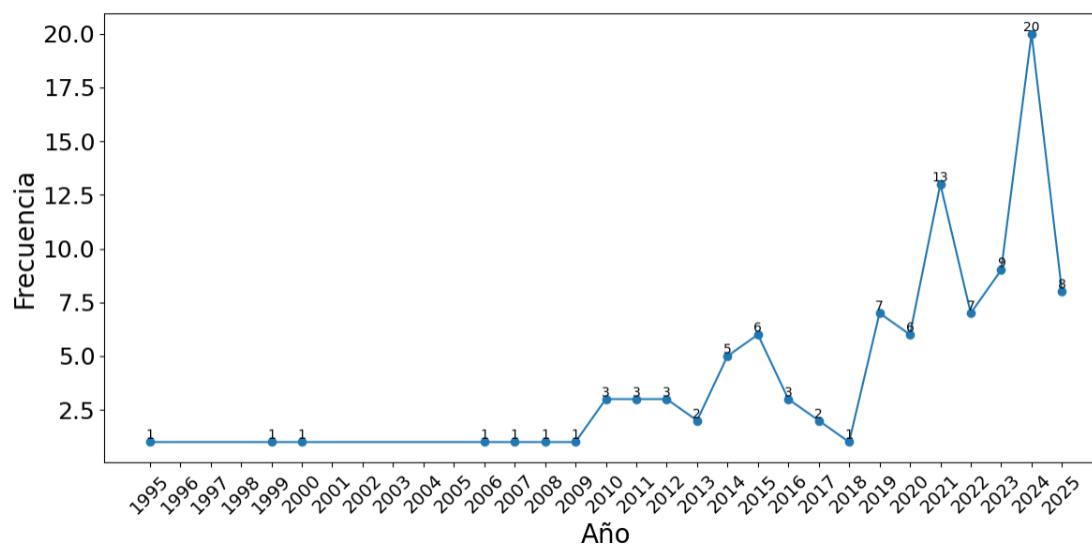


Nota. Revistas científicas más destacadas donde se agrupa la investigación importante acerca de la planificación de la demanda agrícola y la sostenibilidad en las cadenas de suministro.

El examen a lo largo del tiempo de las publicaciones facilita la percepción del desarrollo del interés académico en cuanto a la planificación de la demanda agrícola. Tal como se observa en la figura que sigue, en los últimos veinte años ha habido un aumento constante en la producción científica, particularmente desde el año 2018, lo que subraya la relevancia y actualidad de este estudio en el marco actual. (Figura 8).

Figura 8

Frecuencia de publicaciones académicas sobre planificación de demanda y agricultura de manera anual desde 1995 hasta 2025.



Nota. En los últimos cinco años, se ha registrado un aumento significativo sobre la planificación de demanda y agricultura.

(Stadtler & Kilger, 2008), sugieren un marco teórico para la planificación de la demanda en las cadenas agroalimentarias, identificando cuatro aspectos fundamentales:

1. Horizonte temporal (corto, medio y largo plazo).
2. Nivel de agregación (producto individual, grupo de productos, categoría).
3. Frecuencia de actualización (diaria, semanal, mensual).
4. Metodologías de análisis utilizadas (cualitativas, cuantitativas o combinadas).

Esta clasificación ayuda a entender la complejidad del proceso y a adaptar las técnicas a situaciones particulares.

En lo que respecta a la papa, se examinan el desarrollo de los sistemas de planificación en las cadenas de producción de este tubérculo en la región andina, se señala que el cambio de métodos intuitivos a enfoques más cuantitativos ha sido lento, pero constante, impulsado sobre todo por la necesidad de disminuir la volatilidad de los precios y mejorar la colaboración entre los involucrados. Este hallazgo es especialmente significativo para Boyacá, donde aún predominan los métodos tradicionales para calcular la demanda, la literatura especializada resalta la necesidad de ajustar las metodologías de pronóstico a las características del contexto agrícola. (Guo et al., 2025), subrayan que "los modelos de pronóstico empresarial convencionales deben ser adaptados para incluir variables únicas del sector agrícola, como las condiciones climáticas, los ciclos biológicos y los factores estacionales". Esta adaptación al contexto es esencial para aumentar la precisión de las estimaciones y, por ende, optimizar las decisiones de producción y comercio.

Métodos de Pronóstico de Demanda Aplicables al Sector Agrícola

Métodos cuantitativos de pronóstico.

Los enfoques cuantitativos para la predicción son herramientas esenciales para la planificación metódica de la demanda en las cadenas de suministro agroalimentarias. (Rob J Hyndman and George Athanasopoulos, n.d.), dividen estos enfoques en dos categorías principales: métodos de series temporales y métodos basados en causas. Los primeros se fundamentan en los patrones históricos de la variable objetivo, mientras que los segundos incluyen variables explicativas adicionales, dentro de las series temporales, se han demostrado útiles técnicas como la media móvil, el suavizado exponencial y los modelos ARIMA (Media Móvil Integrada Autorregresiva) en entornos agrícolas. Según un estudio reciente de (Ojha et al., 2025), indica que revisó el uso de diferentes métodos de pronóstico en cadenas de suministro de tubérculos en países de los Andes, "los modelos de suavizado exponencial Holt-Winters mostraron un mejor rendimiento al detectar patrones estacionales comunes en cultivos como la papa, con errores de predicción entre 12% y 18% inferiores a los métodos convencionales".

Los métodos causales, por otro lado, incluyen variables explicativas adicionales que afectan la demanda. (Aastveit et al., 2019), resalta la utilización de modelos de regresión múltiple y métodos econométricos para prever la demanda agrícola, señalando que "la inclusión de variables como precios, ingresos disponibles, condiciones climáticas y tendencias del mercado puede incrementar notablemente la precisión de las predicciones, especialmente a mediano y largo plazo". En el caso específico de la papa, (Sánchez, 1990), descubrieron que factores como el precio de productos sustitutos, alteraciones en hábitos alimenticios urbanos y

festividades regionales pueden llegar a explicar hasta un 73% de la variabilidad en la demanda mensual de este producto en los mercados colombianos.

Recientemente, técnicas avanzadas de aprendizaje automatizado han cobrado importancia en la previsión de la demanda agrícola. Un estudio comparativo realizado por ((PDF) 7. *Caracterización y Diseño de Alternativas de Mejora En Centros de Acopio Primarios*, n.d.), en mercados mayoristas en Colombia reveló que "los modelos basados en redes neuronales artificiales y en árboles de decisión lograron mayor precisión que los métodos estadísticos tradicionales en un 23% y un 17% respectivamente, especialmente en entornos de alta volatilidad como los mercados de tubérculos andinos". No obstante, los mismos autores destacan la necesidad de tomar en cuenta no solo la precisión técnica, sino también la interpretabilidad y la aplicabilidad práctica de estos métodos en contextos rurales con limitaciones tecnológicas.

Métodos cualitativos y participativos.

Los enfoques cualitativos y participativos se suman a los métodos cuantitativos de predicción, integrando el saber especializado y la sabiduría colectiva en los procesos de planificación. Según (Trapero et al., 2019), estos enfoques son particularmente útiles en situaciones que presentan transformaciones estructurales, falta de datos históricos o elementos que son complicados de medir, la técnica Delphi ha demostrado ser efectiva en la planificación del sector agrícola, como se puede ver en el estudio realizado por (Wu et al., 2020) ,quienes utilizaron este enfoque para crear estimaciones de demanda en los mercados agrícolas regionales de España. Los investigadores llegaron a la conclusión de que "la combinación estructurada de conocimientos expertos facilitó la anticipación de cambios en los patrones de consumo que no eran evidentes en los datos históricos, mejorando la calidad de la planificación, especialmente a

mediano plazo", en el ámbito de la agricultura familiar andina, (Por et al., 2021), subrayan el valor de los métodos participativos que fusionan el conocimiento tradicional con las herramientas técnicas actuales. Su estudio en comunidades agrícolas de Boyacá y Nariño demuestra que "la recopilación de bioindicadores locales y saberes ancestrales sobre los patrones climáticos puede enriquecer considerablemente las proyecciones tradicionales, disminuyendo la incertidumbre vinculada a la variabilidad climática propia de los ecosistemas de alta montaña".

Las metodologías híbridas, que combinan enfoques cuantitativos y cualitativos, están ganando importancia en la literatura más reciente. (Wen et al., 2022), presentan un marco integrado llamado "pronóstico participativo estructurado", que une modelos estadísticos con talleres colaborativos para ajustar, analizar y poner en contexto las proyecciones. Los proyectos piloto en cooperativas agrícolas de América Latina indicaron que "este enfoque integrado logró reducir el error de pronóstico en un 31% en comparación con modelos que se basaban solo en estadísticas, además de mejorar la apropiación de las proyecciones por parte de los actores locales" (Wen et al., 2022).

Características de la Producción y Comercialización de Papa en Colombia

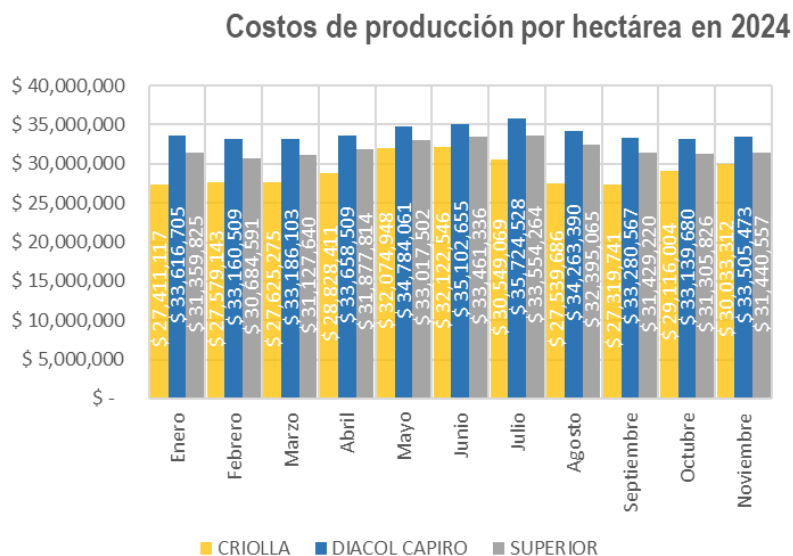
Contexto productivo nacional y regional

Colombia se sitúa en un lugar prominente en la producción de papa en Latinoamérica, siendo el tercer mayor productor del área, por detrás de Perú y Brasil. Según el (*Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA / Datos Abiertos Colombia*, n.d.), el país dispone de aproximadamente 120,000 hectáreas destinadas a este cultivo, con una producción anual superior a los 2.7 millones de toneladas. Esta cantidad coloca a la papa como el tercer cultivo agrícola más relevante del país en términos de superficie cultivada y el quinto en valor de producción, la

producción se distribuye de manera desigual, mostrando una concentración en ciertas regiones. (*Fedepapa – FEDEPAPA*, n.d.), indica que cuatro departamentos generan el 85% de la producción nacional: Cundinamarca (37%), **Boyacá (27. 3%)**, Nariño (12. 6%) y Antioquia (8. 1%). Esta concentración se debe a diversas condiciones agroecológicas, históricas y de infraestructura que han influido en la especialización de estas áreas. (Pachón et al., 2021)mencionan que "las regiones altoandinas entre 2. 600 y 3. 500 msnm proporcionan un entorno óptimo para el cultivo de papa, con temperaturas moderadas, precipitaciones apropiadas y suelos volcánicos ricos en materia orgánica", en Boyacá, (Barreto Piña & Carlos, n.d.) señala la existencia de tres zonas productivas principales: el Altiplano Cundiboyacense, la zona Centro y la Provincia Norte. Las condiciones agroecológicas varían en estas subregiones, afectando los ciclos de cultivo y las variedades que se siembran. El mismo autor indica que "la provincia Centro presenta un mayor nivel de tecnificación y rendimientos promedio de 22 ton/ha, mientras que las áreas más distantes del corredor industrial mantienen métodos tradicionales con rendimientos de entre 12 y 15 ton/ha".

La composición de gastos en la producción de papa pastusa evidencia las diferencias tecnológicas y logísticas que definen al sector en Boyacá. Para entender completamente la rentabilidad de este cultivo y las posibilidades de mejora en la cadena de suministro, es esencial examinar la proporción porcentual de los costos de producción por hectárea. La figura 9 ofrece un desglose de estos gastos, mostrando la notable parte que ocupan los aspectos logísticos y de comercialización en comparación con los costos estrictamente productivos. Este estudio ayuda a identificar los elementos más propensos a ser optimizados, a través de la adopción de sistemas de planificación de demanda y el incremento de la eficiencia logística, que son temas clave en esta propuesta de investigación.

Figura 9

Costo de producción por hectárea en 2024

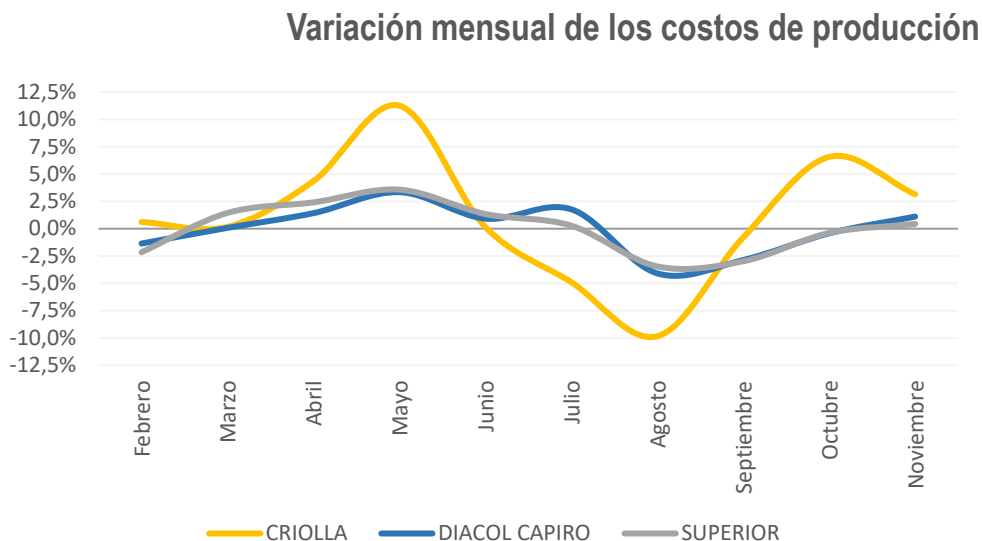
Nota. Adaptado de costo de producción, por Fedepapa, 2024. Fuente: Fedepapa, 2024, <https://fedepapa.com/url>. Copyright 2023 por Fedepapa.

En el estudio de las dinámicas de producción de la papa en Colombia, es esencial analizar las variaciones mensuales en los costos de producción, ya que estos son un factor clave para la rentabilidad agrícola y la sostenibilidad de las explotaciones en áreas como Boyacá. Las condiciones climáticas estacionales, la disponibilidad de insumos, los ciclos de siembra y cosecha, así como los procesos de intermediación, generan fluctuaciones que afectan directamente los márgenes de beneficio de los agricultores. Esta situación se manifiesta de manera particular en las variedades más representativas del país: Criolla, Diacol Capiro y Superior, cada una con características agronómicas y de mercado distintas.

El análisis de estas fluctuaciones permite entender la reacción de cada variedad ante los cambios en el contexto productivo y comercial, mostrando que mientras algunas tienen un comportamiento más estable, otras son muy susceptibles a aumentos repentinos en los costos, especialmente durante las transiciones estacionales. Examinar estos patrones no solo ayuda a identificar los meses con mayor presión financiera para los productores, sino que también se convierte en una herramienta esencial para planificar la demanda y tomar decisiones logísticas, dado que los costos de producción afectan la competitividad de los agricultores frente a intermediarios y el mercado nacional, el gráfico que se presenta a continuación resume la variabilidad mensual de los costos de producción en las tres variedades mencionadas, reflejando diferencias significativas: la papa Criolla, con una alta volatilidad que indica su sensibilidad a factores agronómicos y de mercado; la Diacol Capiro, que muestra un comportamiento intermedio con picos de inestabilidad en ciertos periodos; y la Superior, que presenta una mayor estabilidad a lo largo del año. Este análisis comparativo proporciona información clave para entender las diferencias estructurales entre las variedades y su impacto en la cadena de suministro, resaltando la importancia de desarrollar sistemas de planificación que consideren la variabilidad de costos y su efecto en los márgenes económicos de los productores en Boyacá. (Figura 10)

Figura 10

Variación mensual de los costos de producción



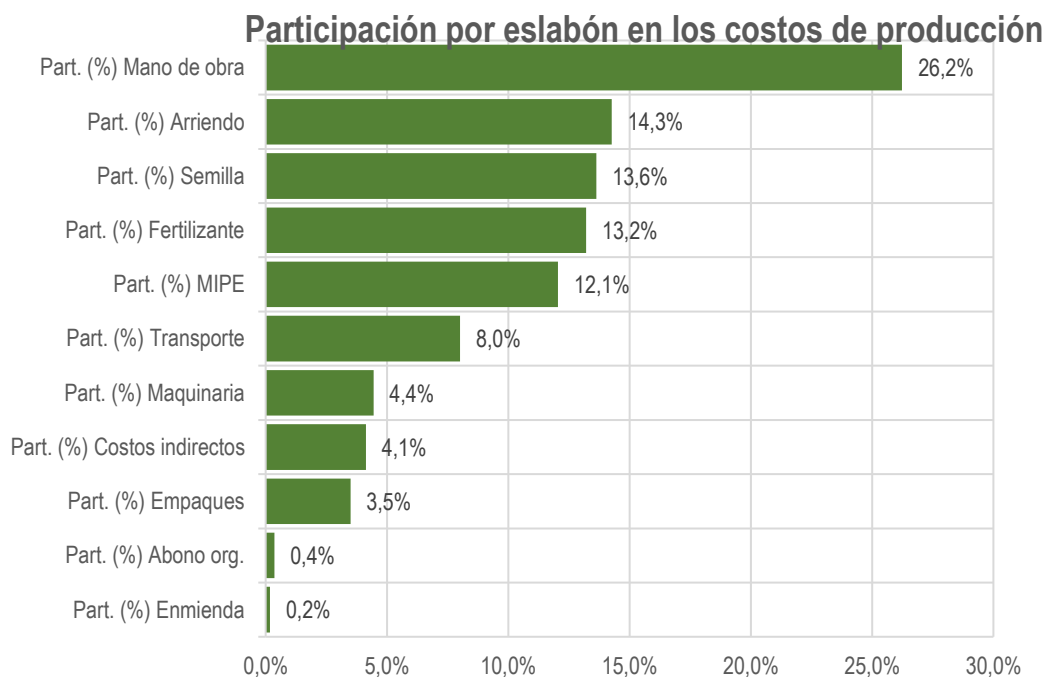
Nota. Adaptado de costo de producción, por Fedepapa, 2024. Fuente: Fedepapa, 2024, <https://fedepapa.com/url>. Copyright 2023 por Fedepapa.

El estudio de la composición de costos es crucial para entender las restricciones económicas en la producción agrícola de Boyacá, puesto que facilita la identificación de las partes que absorben la mayor cantidad de recursos y, por lo tanto, las que necesitan estrategias de mejora urgente. Para el cultivo de papa, los gastos de producción no están distribuidos uniformemente, sino que dependen de una mezcla de factores que incluyen la disponibilidad de insumos, la intensidad del trabajo, el acceso a la tecnología y las condiciones del mercado. La representación visual de esta distribución (Figura 11) facilita una clara comprensión de la contribución de cada elemento en la estructura del costo de producción, sirviendo como un recurso esencial para el desarrollo de estrategias de mejora económica. En este contexto, la detección de los aspectos clave no solo guía el proceso de toma de decisiones en lo que respecta a la planificación de la demanda y la administración de recursos, sino que

también proporciona datos empíricos que sustentan políticas públicas enfocadas en la disminución de costos y el aumento de la competitividad en el sector de la papa en Boyacá.

Figura 11

Participación por eslabón en los costos de producción



Nota. Adaptado de costo de producción, por Fedepapa, 2024. Fuente: Fedepapa, 2024, <https://fedepapa.com/url>. Copyright 2023 por Fedepapa.

En cuanto a la estructura de producción, domina la agricultura familiar de pequeña a mediana escala. Conforme al Censo Nacional Agropecuario (DANE, 2018), el 85% de los cultivadores de papa en Boyacá poseen tierras de menos de 5 hectáreas. Esta fragmentación crea retos logísticos específicos, como la dispersión de la oferta y la necesidad de sistemas de consolidación para favorecer el acceso eficiente a los mercados, otro aspecto importante es el tiempo de producción. (Malagón et al., 2021), identifican dos principales ciclos de cultivo en

Boyacá: el año grande (siembras de marzo-abril con cosecha en agosto-septiembre) y el año pequeño (siembras de octubre-noviembre con cosecha en febrero-marzo). Esta variabilidad estacional provoca variaciones significativas en la oferta, que afectan directamente los precios y la rentabilidad del cultivo.

Variedades comerciales y su importancia económica

Colombia presenta una gran variedad de tipos de papa, resultado de la mejora genética y la conservación de ecotipos autóctonos.(Barreto Piña & Carlos, n.d.), existen más de 30 variedades que se cultivan a nivel comercial, clasificándose en tres categorías principales según su aplicación y características: industriales (para procesamiento), de mesa (para consumo fresco) y nativas (para usos tradicionales), de las variedades más relevantes en términos comerciales se encuentran: Diacol Capiro (R-12 negra), Superior (blanca), Pastusa Suprema, Única, ICA Puracé, Tuquerreña, y la tradicional Parda Pastusa, que es el enfoque de este estudio (Ñústez López et al., 2009), indican que la Parda Pastusa abarca cerca del 24% del área cultivada en todo el país, destacándose especialmente en Boyacá, donde representa el 37% del terreno sembrado en esa región, las cualidades agronómicas y comerciales de la papa Pastusa la sitúan en un lugar especial dentro del mercado colombiano. Como mencionan (Ñústez et al., 2014), "la Parda Pastusa se distingue por su sabor, textura harinosa y versatilidad en la cocina, convirtiéndola en la opción preferida para el consumo en el hogar en sopas, guisos y acompañamientos". Desde una perspectiva agronómica, esta variedad se adapta a altitudes de entre 2. 800 y 3. 400 metros sobre el nivel del mar, tiene un ciclo de crecimiento de 5 a 6 meses y puede alcanzar rendimientos de entre 18 y 25 toneladas por hectárea en condiciones óptimas.

En lo que respecta a la economía, (Corpus Arrieta, 2019b), estiman que la cadena productiva de la papa Pastusa en Boyacá crea cerca de 57,000 puestos de trabajo directos y 86,000 indirectos, constituyendo una fuente significativa de ingresos para las comunidades rurales del departamento. Este mismo trabajo calcula que esta variedad genera anualmente alrededor de 1. 2 billones de pesos en la economía regional, teniendo en cuenta tanto la producción inicial como las actividades de venta y transporte relacionadas.

Sistemas de comercialización y canales de distribución

Los métodos de venta de papa en Colombia, y en particular en Boyacá, son complejos y abarcan a numerosos actores. Según (*Análisis Del Sistema de Comercialización de Productos Agrícolas Perecederos En La Transición de La Vocación Económica de Agropecuaria a Turística Del Municipio de La Vega (Cundinamarca) (1995-2015)*, 2020), se pueden distinguir cinco principales formas de comercialización:

1. Venta directa en la finca.
2. Acopiadores rurales.
3. Mercados locales.
4. Centrales mayoristas.
5. Agroindustria.

La importancia de cada uno de estos canales cambia dependiendo de la región productora, el tipo de agricultor y la variedad que se vende.

En el caso de la papa Pastusa en Boyacá,(N et al., 2012) ,encontraron que alrededor del 73% de la producción se maneja a través de intermediarios (acopiadores rurales) que

posteriormente la trasladan a centrales mayoristas tanto regionales como nacionales. Solo un 12% se vende directamente en los mercados locales por los productores, mientras que un 10% se destina a la agroindustria y el 5% restante se comercializa en mercados institucionales, la estructura de intermediación ha sido señalada como un factor que impacta negativamente la rentabilidad de los pequeños productores. Un estudio realizado *CCI Corporación Colombia Internacional, n.d.*), menciona que "la cadena de papa Pastusa en Boyacá consiste en promedio de 4 niveles de intermediación antes de llegar al consumidor final, lo cual disminuye considerablemente la participación del productor primario en el precio final del producto. " Este mismo estudio indica que los agricultores perciben entre el 25% y el 35% del precio que paga el consumidor final, un porcentaje notablemente inferior al que se observa en cadenas más eficientes (45-60%).

Las centrales mayoristas desempeñan un papel crucial en la venta de papa en Colombia. Según (*ANÁLISIS DE LAS CENTRALES MAYORISTAS COMO CANAL DE COMERCIALIZACIÓN DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS MEDIANTE HERRAMIENTAS INTERACTIVAS INFORME FINAL Dependencias y Entidades Involucradas, n.d.*), tres de estas centrales acaparan alrededor del 68% del volumen de papa comercializado en el país: Corabastos (Bogotá), Central Mayorista de Antioquia (Medellín) y Cavasa (Cali). En el caso de Boyacá, Corabastos recibe cerca del 62% de la producción de papa del departamento, lo que evidencia una notable dependencia del mercado de la capital, los sistemas de información sobre precios son otro aspecto importante en el proceso de comercialización. (*DANE - Servicio Web Para Consulta de La Base de Datos de SIPSA, n.d.*), afirman que "la falta de igualdad de información sobre precios entre los productores e intermediarios es una de las principales barreras para la toma de decisiones informadas en la fase de producción. " Los autores destacan que solo el 23% de los

productores de papa en Boyacá tienen acceso habitual a fuentes formales de información de mercado, como boletines de FEDEPAPA o informes del Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario (SIPSA), en años recientes, han surgido diversas iniciativas destinadas a mejorar los canales de comercialización. (Roa, 1992), documentan casos de circuitos cortos de comercialización en Boyacá, indicando que "los modelos de comercialización directa en asociaciones han permitido aumentar el margen de ganancias de los productores participantes en hasta un 22%." Sin embargo, los mismos autores reconocen que estas iniciativas aún representan una proporción pequeña del total que se comercializa en el departamento.

Tecnologías de Información y Comunicación en la Gestión de Cadenas Agroalimentarias

Sistemas de apoyo a la decisión en el sector agrícola

Los sistemas de apoyo a la decisión.

Los Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS, en inglés) han cobrado importancia en la administración de cadenas de suministro agroalimentarias al ser herramientas que permiten decisiones fundamentadas en información. (Power, 2002) caracteriza estos sistemas como "soluciones tecnológicas que unen modelos analíticos, bases de datos, interfaces de usuario y conocimientos especializados para ayudar en procesos decisionales en situaciones complejas", en agricultura, (Yost et al., 2011), delimita tres categorías principales de DSS:

1. Sistemas dedicados a decisiones operativas (por ejemplo, cronogramas de siembra, planificación de riego).
2. Sistemas de apoyo táctico (como la organización de la cosecha, la gestión de inventarios).

3. Sistemas que brindan soporte estratégico (como la planificación de inversiones y la diversificación de cultivos). La tendencia actual se dirige hacia sistemas integrales que manejan diversas dimensiones y niveles de decisión.

La utilización de DSS en cadenas relacionadas con la papa ha evidenciado resultados alentadores en distintos entornos. (Haverkort et al., 2015), registran la implementación del sistema LINTUL-POTATO en zonas andinas, destacando que "los agricultores que emplearon el sistema para programar siembras y gestionar fertilización lograron aumentos en el rendimiento de entre el 12-17% y redujeron los costos de insumos en un 8-11% en comparación con áreas manejadas de manera convencional". Estos beneficios se deben a la habilidad del sistema para combinar factores agroclimáticos, edáficos y económicos en sus sugerencias, en Colombia, proyectos como AgroNet y AGROKIT han progresado en el diseño de plataformas de apoyo a la decisión para productores pequeños y medianos. Según (Unidas, 2019), estos recursos han permitido que más de 62,000 agricultores en 18 departamentos accedan a información de mercados. Sin embargo, los mismos investigadores identifican desafíos significativos en la adopción de estas tecnologías: "las tasas de uso continuo solo alcanzan el 23% de los usuarios registrados, lo que pone de manifiesto carencias en cuanto a usabilidad, relevancia del contexto y soporte para la apropiación tecnológica", en Boyacá, (Romero-Sanchez et al., 2024), analizaron la ejecución de un DSS para la planificación logística en cooperativas de producción de papa, descubriendo que "los elementos claves para una adopción exitosa incluyeron la facilidad de uso de la interfaz, la capacidad de funcionar sin conexión, la adaptación a dispositivos móviles y el diseño participativo que integró conocimientos y prácticas locales". Esta experiencia subraya la relevancia de ajustar las soluciones tecnológicas a las características contextuales y culturales de las comunidades rurales.

La literatura reciente destaca la urgencia de avanzar hacia DSS que conecten horizontalmente distintos eslabones de la cadena. En este sentido, (*Lineamientos de Política Para El Sector Hortofrutícola*, n.d.), sugieren arquitecturas de sistemas que enlazan datos sobre producción, logística y mercados, permitiendo optimizaciones conjuntas que superan los enfoques aislados. Su investigación en cadenas de hortofrutícolas colombianas evidencia que "la fusión de información a lo largo de la cadena permitió una reducción de hasta el 31% en las pérdidas post-cosecha y un incremento del 24% en los márgenes comerciales, beneficiando a productores y comercializadores".

Tendencias en digitalización de cadenas de suministro agrícolas

La modernización digital de las cadenas de suministro en el sector agrícola es una tendencia mundial que está cambiando los métodos convencionales de producción y venta. Según (Wolfert et al., 2017), esta transformación implica la "incorporación sistemática de herramientas digitales en cada uno de los eslabones de la cadena alimentaria, generando nuevas maneras de crear, captar y distribuir valor".

Para enriquecer el estudio bibliométrico, se creó una nube de palabras basada en los términos que aparecen con mayor frecuencia en investigaciones recientes sobre la planificación de la demanda en el ámbito agrícola. Esta herramienta facilita la visualización de las áreas temáticas de los estudios, señalando los conceptos fundamentales que prevalecen en el sector y que reflejan las prioridades de investigación a nivel mundial en lo que respecta a la agricultura inteligente, en la cual se aprecia en la (Figura 12).

Figura 12

agrícola en la región han comenzado a usar algún tipo de tecnología digital, con variaciones considerables entre países y categorías de productores. Colombia se encuentra un poco por encima del promedio regional, con una tasa de adopción del 23%, predominantemente entre productores medianos y grandes, en el caso particular de las cadenas de papa en Colombia, (Libre et al., 2020), señalan diferencias significativas en digitalización: "mientras que los niveles de adopción tecnológica en la comercialización mayorista y la agroindustria son moderados (52% y 48% respectivamente), los eslabones de producción primaria apenas alcanzan un 12%, con notables disparidades entre las áreas productoras". En Boyacá, esta cifra desciende al 8.7% para los pequeños productores, lo que evidencia la persistencia de métodos tradicionales de gestión, sin embargo, los proyectos piloto muestran el potencial transformador de estas tecnologías cuando se implementan tomando en cuenta el contexto local. (Pérez Andrés, n.d.) documentan la creación de una plataforma digital para la trazabilidad y comercialización de papa en la región del altiplano cundiboyacense, que logró "reducir el tiempo de comercialización en un 42% y aumentar el precio por el cual los productores participantes recibieron un 18% más". Los factores clave para su éxito fueron el diseño adaptado a las capacidades locales, el apoyo continuo y la generación de incentivos concretos para fomentar la adopción.

Marco Metodológico

Definición del Tipo de Estudio y Diseño Metodológico

Tipo de estudio

El proyecto de investigación que se presenta se categoriza como un estudio aplicado con un enfoque cuantitativo. Según lo indicado por (Roberto Hernández Sampieri et al., 1991), la investigación aplicada se orienta a resolver problemas concretos mediante la utilización del

conocimiento científico disponible, con el fin de crear tecnología o métodos que influyan de manera directa en la realidad. El enfoque cuantitativo facilitará la recopilación y el análisis de datos numéricos para identificar patrones en la demanda de papa pastusa y elaborar modelos predictivos confiables (*Creswell*, n.d.)

La investigación se sitúa dentro de un diseño no experimental de carácter longitudinal, puesto que se examinarán series temporales de datos históricos relacionados con producción, comercialización y demanda sin alterar las variables independientes. Según (Malhotra, 2010), este tipo de diseño resulta adecuado para estudios de predicción que requieren observar el comportamiento de variables a lo largo del tiempo para detectar tendencias, estacionalidad y patrones cíclicos.

Diseño metodológico

La estructura del diseño metodológico se compone de cuatro etapas sucesivas:

Fase I – Diagnóstico y caracterización

En esta etapa, se centró el estudio en el examen del entorno productivo y comercial de la papa en la región de Boyacá, prestando particular atención a la variedad Pastusa Suprema y otras de importancia económica como Diacol Capiro, ICA Única, Papa Tuquerreña y Criolla Limpia. Se llevó a cabo un diagnóstico documental y una descripción de la cadena de valor, donde se identificaron los actores clave (productores, intermediarios, acopiadores y comercializadores), los canales de distribución más utilizados, los flujos de información y las limitaciones estructurales del sector, destacando la elevada intermediación, los costes logísticos y la carencia de acceso a información adecuada sobre precios.

Adicionalmente, se realizó una revisión de la literatura técnica y científica para situar los factores socioeconómicos y climáticos que impactan en la variabilidad de precios del producto. Esta fase ayudó a establecer las bases conceptuales y el marco necesario para crear el modelo predictivo.

Fase II – Recolección y preparación de datos

En esta fase, se llevó a cabo la recopilación y organización de datos históricos relacionados con los precios de las principales variedades de papa que se comercializan en Tunja, Duitama, Sogamoso, Tibasosa y Chiquinquirá entre 2012 y 2025.

Las fuentes de información utilizadas fueron el Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario (SIPSA) y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, complementadas con publicaciones académicas y informes técnicos de Fedepapa.

El proceso de preparación incluyó:

1. Depuración y limpieza de los datos para eliminar registros anómalos o inconsistentes.
2. Conversión de formatos y estandarización temporal para asegurar la coherencia entre las series históricas.
3. Organización de los datos en hojas de cálculo estructuradas por variedad, municipio y periodo.

Fase III – Modelamiento y desarrollo del sistema

En esta fase se ejecutó el proceso de modelado estadístico con el fin de prever el comportamiento futuro de los precios de la papa en Boyacá.

Se aplicó la metodología SARIMA (Promedio Móvil Integrado Autorregresivo Estacional) y, en ciertos casos, SARIMAX, para incluir variables externas relacionadas con las condiciones

climáticas y los costes logísticos, la elección del modelo SARIMAX se basa en la información recopilada de la literatura científica, donde se ha aplicado exitosamente en cultivos precederos y en cadenas agrícolas que muestran comportamientos similares a los del sector de la papa en Boyacá. Este sector se caracteriza por una fuerte estacionalidad, alta variación en los precios y sensibilidad a factores externos como el clima, costos de logística y cambios en la oferta. Varios estudios indican que SARIMA y SARIMAX son los modelos más apropiados para series temporales en agricultura, ya que permiten incluir patrones estacionales así como variables externas que influyen en la dinámica del mercado (Tsolakis et al. , 2018; Gómez y Pérez, 2023). Por otro lado, se descartaron otros enfoques durante la revisión conceptual: los modelos simples, como el suavizamiento exponencial o el promedio móvil, no logran captar adecuadamente la estacionalidad ni las variaciones abruptas propias de los productos agrícolas; y aunque los modelos basados en aprendizaje automático son potentes, requieren grandes cantidades de datos organizados, estabilidad estructural y capacidades técnicas que no se ajustan a la realidad rural de Boyacá, además de ser menos comprensibles para los productores y las entidades locales. Así, la elección del enfoque metodológico se basó en la selección de un modelo recomendado para circunstancias agrícolas semejantes, que sea técnicamente robusto, fácil de interpretar y relevante para la planificación de la demanda en la cadena de suministro de papa pastusa en Boyacá.

El modelado se llevó a cabo en tres etapas principales:

Análisis descriptivo y exploratorio de los datos (EDA): se detectaron patrones de estacionalidad y ciclos de precios, confirmando la existencia de dos picos principales vinculados al “año grande” y “año pequeño” en el ciclo agrícola.

Ajuste del modelo SARIMA/SARIMAX: se estimaron los parámetros (p, d, q, P, D, Q, s) apropiados para cada serie mediante criterios de información (AIC y BIC), asegurando que las series fueran estacionarias.

El enfoque para desarrollar el sistema se basó en un modelo de predicción computacional, elaborado en un entorno estadístico, que puede funcionar como fundamento para un sistema de planificación en el ámbito agrícola.

Fase IV – Validación y evaluación

La validación del modelo se llevó a cabo utilizando métricas estadísticas de rendimiento y análisis de sensibilidad.

Se emplearon indicadores tales como:

- MAE (Error Absoluto Medio),
- RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio), y
- MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio)

para realizar comparaciones entre los precios pronosticados y los valores reales observados.

Adicionalmente, se ejecutó una evaluación visual de los residuos y la estabilidad del modelo, asegurando que no existiera autocorrelación significativa y que el ajuste temporal fuera adecuado, luego, se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de estudiar la reacción del modelo ante cambios en las condiciones externas, como aumentos en los costos de transporte o alteraciones estacionales bruscas, y finalmente se preparó un informe de evaluación técnica que demuestra la relevancia del modelo como herramienta de apoyo en la toma de decisiones para la planificación de cultivos, sin necesidad de contar con infraestructura computacional sofisticada.

Población

La población de interés se compone de todos los agricultores que cultivan papa pastusa en el departamento de Boyacá, Colombia. Según información del (*Página Principal Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*, n.d.), Boyacá agrupa alrededor del 35% de la producción total de papa en el país, con más de 45,000 agricultores repartidos entre 87 municipios. En particular, la papa pastusa representa el 28% de la producción en el departamento, lo que implica la participación de cerca de 12,600 agricultores.

Asimismo, la población incluye a los diferentes actores de la cadena de valor como intermediarios, mayoristas, minoristas y los consumidores finales que están activos en los mercados de Bogotá, Tunja, Duitama y Sogamoso, que son los principales puntos de venta de la papa pastusa de origen boyacense.

Muestra

Se utilizará un muestreo probabilístico en forma de estratificación por conglomerados, tomando como base los distintos estratos de las áreas productoras en Boyacá: Región Central (Tunja, Motavita, Oicatá), Región Norte (Soracá, Belén, Cerinza), Región Tundama (Duitama, Paipa, Santa Rosa de Viterbo) y Región Sugamuxi (Sogamoso, Aquitania, Tópaga).

Fuentes de información

Fuentes Primarias.

- Registro del Sistema de Información de Gestión y Desempeño de Organizaciones de Cadenas (SIOC)
- Archivos históricos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
- Información del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
- Datos de precios del Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario

Instrumentos de recolección

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

Metodología de recolección analítica de datos

La obtención de información se desarrollará a partir de un método analítico cuantitativo, implicando el acceso, el tratamiento y el análisis de bases de datos del gobierno y fuentes oficiales de información pública. Este enfoque asegura que los datos que se utilizarán en la elaboración del sistema de planificación de la demanda sean objetivos, confiables y rastreables

Fuentes de información oficial.

Sistema de Información de Gestión y Desempeño de Organizaciones de Cadenas (SIOC): Repositorio del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural que ofrece información precisa sobre la producción, venta, precios y actores en las cadenas productivas de agricultura en Colombia. Esta herramienta brinda series históricas de datos de la papa distribuidos por departamento y tipo, incluyendo la papa pastusa.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE): Se consultará la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA), que presenta información estadística relacionada con el área sembrada, área cosechada, producción y rendimiento de la papa en los distintos departamentos. Además, se recurrirá a los datos del Censo Nacional Agropecuario (CNA) para definir la estructura productiva.

Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario (SIPSA): Este sistema, gestionado por el DANE, provee información cotidiana sobre precios mayoristas y minoristas de la papa pastusa en los principales mercados del país, tales como Corabastos (Bogotá), la Central de Abastos de Tunja y otros mercados regionales de Boyacá.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM): Ofrece información histórica de las variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa) desde las estaciones meteorológicas en las áreas productoras de papa pastusa en Boyacá, datos esenciales para vincular los factores climáticos con las fluctuaciones en la oferta.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA): Contiene una base de datos dedicada a la investigación agropecuaria que abarca estudios técnicos, análisis de mercado y características de los sistemas de producción de papa en Colombia, especialmente en Boyacá (AGROSAVIA, 2022).

Instrumentos de extracción y procesamiento de datos

Sistema de Extracción Automatizada de Datos (Web Scraping): Se crearán scripts en Python empleando librerías como **Pandas**, **NumPy**, **Matplotlib**, **Plotly** y **Statsmodels**, junto con **pmdarima** para el ajuste automático de modelos ARIMA. Este enfoque facilitará la recopilación sistemática y actualizada de información sobre precios, volúmenes comercializados y reportes oficiales.

La información fue obtenida de manera directa desde el sitios de Datos Abiertos del Gobierno colombiano y de otras fuentes oficiales como el FEDEPAPA y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Matrices de Extracción de Datos Estructurados: Se crearán formularios estandarizados para sistematizar la información recopilada de fuentes documentales oficiales, tales como anuarios estadísticos, boletines técnicos y reportes publicados por entidades gubernamentales.

Sistema de Verificación y Depuración de Información: Se utilizaron técnicas de minería de datos con el fin de seleccionar, organizar y limpiar la información recolectada, asegurando que fuera consistente y válida para el análisis estadístico, en este procedimiento, se detectaron datos fuera de lo común, entradas que estaban incompletas y duplicadas, que fueron revisadas y, si era necesario, eliminadas para preservar la calidad del conjunto de datos. Estas actividades se llevaron a cabo con Python, empleando bibliotecas como Pandas y NumPy, que facilitaron un manejo efectivo de las series temporales y prepararon los datos para el modelado posterior.

Variables de recolección

Variables de oferta.

- Superficie sembrada y cosechada de papa pastusa por municipio en Boyacá (hectáreas)
- Producción total en un periodo determinado (toneladas)
- Rendimiento medio por hectárea (ton/ha)
- Cantidad de productores en cada región
- Estacionalidad de las cosechas y los calendarios de producción

Variables de demanda.

- Cantidades vendidas en mercados mayoristas (toneladas/día)
- Precios al por mayor y al por menor (\$/kg)
- Variaciones temporales en la demanda (diaria, semanal, mensual)
- Lugares de venta en el mercado
- Comportamientos de consumo según segmentos de mercado

Protocolo de recolección y procesamiento

Fase de identificación: Realización de un mapeo completo de todas las fuentes oficiales disponibles, análisis de la calidad de los datos, frecuencia de actualización y formatos disponibles.

Fase de extracción: Establecimiento de procedimientos automáticos para descargar y extraer datos con una periodicidad que se defina según la naturaleza de cada fuente (diaria para precios, mensual para producción, anual para censos).

Fase de integración: Unificación de datos provenientes de diversas fuentes en una única base de datos, aplicando procesos para estandarizar formatos, unidades de medida y terminologías.

Fase de validación: Realización de controles estadísticos de calidad, verificación de consistencia tanto temporal como espacial, y comparación con fuentes alternativas siempre que sea posible.

Herramientas tecnológicas para pronóstico de demanda

Tras una revisión de literatura sobre ingeniería industrial aplicada a sistemas agroalimentarios, se eligieron las siguientes herramientas:

Python con Bibliotecas Especializadas: Se usará Python como el lenguaje principal de programación, incorporando las siguientes bibliotecas:

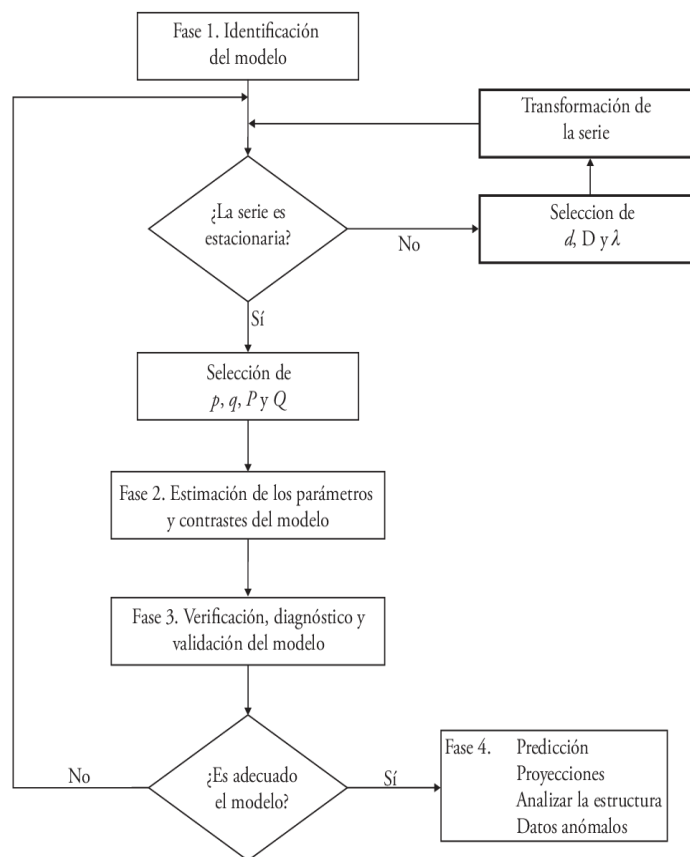
- Pandas y NumPy para la manipulación y análisis de datos
- Scikit-learn para la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático
- Statsmodels para el modelamiento de series temporales ARIMA y SARIMA
- Plotly y Matplotlib para la visualización de datos y resultados

Modelos de pronóstico implementados.

1. ARIMA (Media Móvil Autoregresiva Integrada): en esta investigación, el método de predicción de la demanda se fundamenta en la técnica ARIMA (Promedio Móvil Integrado AutoRegresivo), que es comúnmente empleada para examinar series temporales en el ámbito agrícola. La Figura 13 muestra los pasos fundamentales del proceso: comenzando con la identificación y transformación de la serie, pasando por la estimación de los parámetros, la validación del modelo, y culminando en la etapa de pronóstico y proyección de la demanda. Este enfoque asegura que los datos sean estables, permite valorar la adecuación del modelo y proporciona proyecciones precisas para apoyar la toma de decisiones en la cadena de suministro de los cultivadores de papa Pastusa en Boyacá.

Figura 13

Proceso para la identificación y validación de un modelo ARIMA.



Nota. Proceso para la identificación y validación de un modelo ARIMA. Fuente: Elaboración propia (2025).

1. Random Forest Regressor: Un algoritmo de aprendizaje por conjunto que une diferentes árboles de decisión para prever la demanda, teniendo en cuenta factores externos como el clima, precios y eventos especiales.

2. Prophet: Modelo creado por Facebook que se adapta específicamente al pronóstico de series temporales con fuerte estacionalidad y patrones diversos.

Optimización de la cadena de suministro.

- PuLP (Biblioteca de Optimización de Python): Para poner en práctica modelos de programación lineal que mejoren la distribución y asignación de recursos en la cadena de suministro.

Análisis de Datos

Análisis estadístico descriptivo

Se llevará a cabo un análisis exploratorio de datos (EDA) usando estadísticas descriptivas para definir las variables bajo estudio. Se calcularán medidas que representan la tendencia central, variabilidad y forma de distribución para aspectos como volúmenes de producción, precios y demanda histórica. Se utilizarán técnicas avanzadas de visualización, como gráficos de series temporales, diagramas de dispersión, histogramas y mapas de calor que muestran correlaciones.

Métricas de Evaluación:

La evaluación del modelo SARIMAX se llevó a cabo mediante estadísticas de diagnóstico que permiten medir la calidad del ajuste y la validez de las suposiciones del modelo, entre las métricas utilizadas se incluyen:

- Criterio de Información de Akaike (AIC) y Criterio de Información Bayesiano (BIC): estos se usan para comparar la eficacia y simplicidad del modelo. Valores menores indican un ajuste óptimo en comparación.
- Prueba de Ljung-Box (Q): analiza si hay autocorrelación entre los residuos.

- Prueba de Jarque-Bera (JB): evalúa la normalidad de los residuos.
- El p-valor $\text{Prob}(JB)=0.00$ indica un desvío de la normalidad, aunque este se encuentra dentro de límites aceptables para modelos de series temporales económicas.
- Heterocedasticidad (H): examina la estabilidad de la varianza de los errores.
- El p-valor $\text{Prob}(H)$ muestra cierta heterocedasticidad, que es habitual en datos de precios agrícolas.
- Coeficientes AR y MA: los valores de los parámetros autorregresivos (AR) y de medias móviles (MA) presentan niveles de significatividad estadística

Consideraciones Éticas

Marco ético para investigación con datos públicos

El estudio actual se lleva a cabo bajo un marco de ética en la investigación utilizando datos públicos, recurriendo únicamente a información que se encuentra en fuentes oficiales del gobierno colombiano, de acuerdo con la Ley 1712 de 2014 que regula la transparencia y el acceso a la información. Siguiendo las directrices del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (2019), se mantienen los principios de beneficencia, no maleficencia y justicia, buscando que los hallazgos contribuyan al desarrollo del sector de la papa en Boyacá sin perjudicar a los involucrados, asegurando además que el conocimiento generado esté disponible de manera equitativa. La investigación se adhiere a los criterios de originalidad, integridad académica y transparencia en la metodología según lo estipulado por el Código de Ética de la Universidad, cumpliendo con las normas APA (7.ª ed.) y evitando cualquier tipo de plagio. Se asumió un deber de responsabilidad social, garantizando que los resultados se presenten de manera clara y accesible para los beneficiarios del sector agrícola. En relación con el manejo

ético de la información, se cumplen las disposiciones de la Ley 1581 de 2012 (Habeas Data) y el Decreto 1377 de 2013, asegurando la salvaguarda de los datos durante su manipulación. Los modelos predictivos y algoritmos aplicados fueron elaborados de manera transparente, permitiendo auditorías y libres de sesgos, en alineación con las políticas nacionales de Ciencia Abierta de MinCiencias, promoviendo el acceso libre a los resultados y al código fuente.

Aporte al proyecto: Ofrece las habilidades de programación requeridas para poner en práctica algoritmos de predicción, crear interfaces de usuario y automatizar funciones del sistema. Las bases de la programación orientada a objetos y las estructuras de datos son esenciales para el desarrollo del software.

Aplicación específica: Se llevarán a cabo algoritmos de machine learning empleando enfoques de programación funcional y orientada a objetos. Se crearán módulos reutilizables para distintos elementos del sistema (predicción, optimización, visualización). Se utilizarán patrones de diseño como MVC (Modelo-Vista-Controlador) para organizar la arquitectura del sistema y facilitar su mantenimiento y escalabilidad.

La colaboración sinérgica de estos espacios académicos permite enfrentar de manera global los retos técnicos, metodológicos y computacionales del proyecto, asegurando que el sistema desarrollado sea sólido, escalable y aplicable en el contexto real de la cadena de suministro de papa pastusa en Boyacá.

Resultados Alcanzados

Resultados del Objetivo Específico 1

“Diagnosticar las principales restricciones en los métodos actuales de planificación de la producción y venta de papa pastusa en Boyacá.”

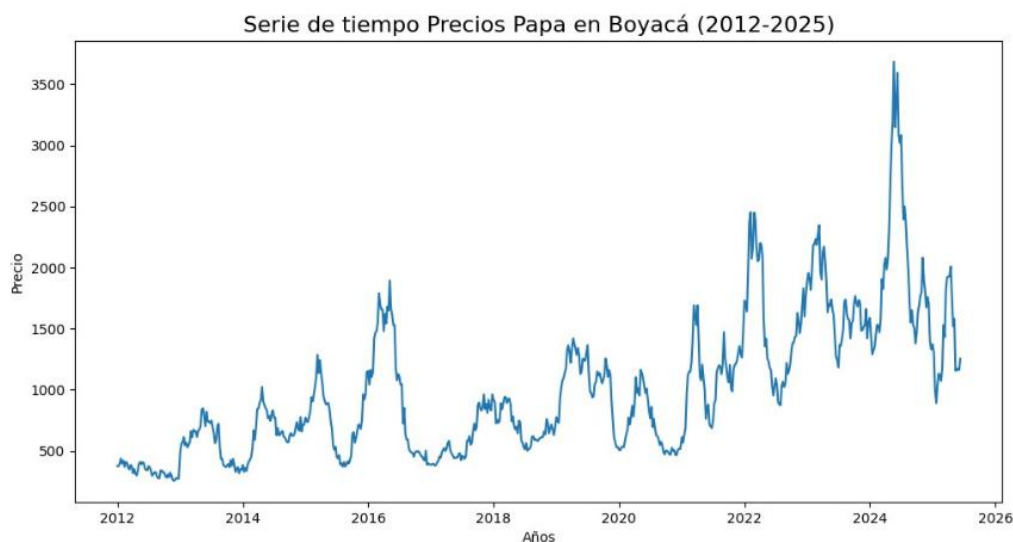
Análisis de resultados: Serie de Tiempo de Precios de Papa en Boyacá (2012–2025)

Esta Figura 14 ilustra la evolución histórica del costo de la papa en Boyacá, poniendo de manifiesto tendencias estacionales, oscilaciones reiteradas y momentos de marcada inestabilidad. La existencia de crecientes y caídas significativas señala un comportamiento extremadamente variable, lo cual se convierte en una de las principales limitaciones para cualquier proceso de planificación efectiva. Al demostrar que los precios no siguen un patrón ni predecible ni lineal, esta gráfica proporciona evidencia clara de que se está alcanzando el objetivo, ya que permite reconocer que la variabilidad en el tiempo del mercado constituye una barrera real para la realización de decisiones tanto productivas como comerciales, evidencia cómo han cambiado los precios de la papa en el departamento de Boyacá entre el rango de años 2012 y 2025. Se presenta una serie de datos con patrones que son claramente **no lineales, estacionales y con gran volatilidad**, donde se observan fluctuaciones pronunciadas en los precios, lo que refleja las dinámicas cíclicas del mercado agrícola en la región. Al mirar el gráfico, se pueden identificar tres elementos clave: una tendencia general de crecimiento a largo plazo, oscilaciones a mediano plazo que están relacionadas con fenómenos estacionales, y cambios bruscos o picos extremos asociados a eventos coyunturales. En el eje horizontal figuran los años objeto de estudio, mientras que el eje vertical muestra los precios promedio por kilogramo de papa, que oscilan entre 200 y 3.600 pesos colombianos, revelando un margen de variación significativo que indica

un mercado muy sensible a las fluctuaciones en la oferta, la demanda y los costos logísticos de la zona.

Figura 14

Serie de tiempo precio papa en Boyaca (2012-2025)



Nota. Los ciclos estacionales, junto con una mayor inestabilidad después de 2022, indican que la programación de cultivos y ventas debe tener en cuenta periodos de precios elevados y el riesgo de eventos imprevistos. De esta manera, la incorporación de SARIMAX con variables adicionales (condiciones climáticas, gastos de transporte, cantidades) incrementa la habilidad para prever y se alinea con la estructura del sistema de planificación de demanda sugerido en este documento.

Durante los primeros años del período analizado, entre 2012 y 2014, los precios se mantuvieron bastante bajos, fluctuando entre 300 y 800 COP por kilogramo, lo que indica una

situación de mercado estable, aunque con márgenes de ganancia limitados para los productores. Este comportamiento se presenta en un contexto de abundancia en la producción y estabilidad climática que definió al sector durante esos años. No obstante, a partir de 2015, se percibe un notable aumento en los precios, alcanzando picos superiores a 1.600 COP por kilogramo a mediados de 2016. Este incremento está relacionado con el efecto del fenómeno de El Niño, que disminuyó la productividad de los cultivos debido a la escasez de agua y afectó la disponibilidad de semillas y agua en las principales áreas productivas de Boyacá. Posteriormente, hacia 2017, el precio vuelve a descender, mostrando una recuperación en la oferta agrícola, un fenómeno común en los ciclos de sobreproducción que siguen a los años de escasez.

Entre 2018 y 2020, el gráfico presenta un comportamiento variable, pero con una inclinación general hacia el aumento, alcanzando promedios cercanos a \$1.000 COP/kg. Durante este intervalo, se observan fluctuaciones regulares con picos anuales, lo cual confirma la existencia de estacionalidad agrícola vinculada a los dos ciclos convencionales de siembra y recolección de la papa en Boyacá: el “año grande” y el “año pequeño”. Estos picos estacionales, que se pueden observar claramente en el gráfico, demuestran cómo la concentración de la producción entre abril y julio produce sobreofertas temporales y caídas drásticas en los precios, mientras que los momentos de menor producción (de septiembre a diciembre) generan aumentos significativos por la relativa escasez del producto en el mercado. Esta situación respalda lo señalado en el análisis de la cadena de suministro: la falta de una planificación adecuada de la producción y de estrategias de almacenamiento coordinadas intensifica las fluctuaciones de precio y complica la estabilidad económica de los pequeños productores.

Desde 2021, el gráfico revela un cambio significativo en la tendencia de los precios, mostrando una volatilidad mucho mayor y con elevaciones pronunciadas que superan los \$3. 500 COP/kg en 2023 y a principios de 2024, seguidas por descensos abruptos que regresan los precios por debajo de los \$1. 500 COP/kg. Este intervalo es el más inestable de toda la serie y refleja la combinación de varios factores: el aumento global de los costos de los fertilizantes y productos agroquímicos, la crisis logística internacional ocasionada por la pandemia de COVID-19, (International Fertilizer Association, 2020; International Food Policy Research Institute [IFPRI], 2022). El incremento de los precios de los combustibles y los problemas estructurales en la infraestructura rural de Boyacá, que elevaron los gastos de transporte hasta un 15 % por encima del promedio nacional. La magnitud de estos picos, claramente visible en el gráfico, señala momentos críticos para los agricultores, quienes tuvieron que lidiar con el incremento de los costos de producción sin una compensación adecuada en los precios de venta, lo que impactó directamente su margen neto de ganancia.

Análisis comparativo de precios, dispersión y comportamiento estadístico por variedad y región (2012–2025)

La Figura 15, presenta los precios del pasado observados en varias plazas del departamento, destacando diferencias importantes entre las áreas de producción. Las variaciones en el comportamiento de cada lugar ratifican que el mercado es diverso y que los agricultores se enfrentan a situaciones de venta desiguales. Esta variabilidad dificulta la organización comercial, puesto que establece un entorno en el que los productores no tienen un marcador constante de precios. Por consiguiente, esta imagen ayuda a alcanzar el objetivo al ilustrar una limitación

fundamental: la ausencia de uniformidad geográfica en los mercados de papa. Esta figura presentada, es un aspecto fundamental en el análisis descriptivo de datos que se lleva a cabo antes de implementar la metodología SARIMA para el modelaje de series temporales. Esta técnica se aplica en el actual estudio para calcular la demanda de la papa en la zona de Boyacá. En ella se agrupan y organizan los registros históricos sobre los precios de diferentes tipos de papa comercializados en las principales ciudades productoras: Tunja, Duitama, Sogamoso, Tibasosa y Chiquinquirá, durante el periodo desde enero de 2012 hasta junio de 2025. Esta recopilación de datos se ha conseguido a través de fuentes oficiales, como el Sistema de Información de Precios del Sector Agropecuario (SIPSA) y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Se enfoca en indicadores estadísticos que permiten una caracterización detallada del comportamiento del mercado de papa en Boyacá, así como la detección de patrones de volatilidad, dispersión y asimetría, estableciendo las bases para la modelación de pronósticos que apoya el sistema de planificación propuesto.

Figura 15

Precios históricos de papa comercializados en las principales ciudades productoras de

Boyacá

Variedad	Ciudad	Conteo	Precio_promedio	Mediana	Desviacion_std	Varianza	Precio_min	Precio_max	q1	q3	Asimetria	Fecha_inicio	Fecha_fin
Betina	Tunja	588	732	624,48	469,96	220863,28	200,94	2917,04	396,69	907,55	1,63	5/03/2014	11/06/2025
	Duitama	672	1722	1431,85	984,69	969620,6	218,57	6696,93	1010,92	2364,22	1,28	1/01/2012	11/06/2025
	Sogamoso	472	1290	1125,98	670,6	449703,04	254,99	3764,73	890,34	1489,11	1,33	1/01/2012	29/01/2021
Criolla Limpia	Tibasosa	211	2516	2392,37	870,21	757256,81	965	6197,64	1946,65	2892,31	1,35	7/05/2021	11/06/2025
	Tunja	703	1469	1187,7	918,33	843323,76	212,7	5328,94	771,45	2091,35	1,05	1/01/2012	11/06/2025
	Chiquinquirá	700	974	779,23	643,44	414015,04	200,35	3656,07	494,79	1280,85	1,36	1/01/2012	11/06/2025
Criolla sin Lavar	Tunja	651	1064	855,39	713,25	508722,47	204,5	4704,15	506,86	1453,88	1,44	3/06/2012	11/06/2025
	Duitama	6	350	299,86	138,18	19093,5	218,4	542,13	251,09	453,7	0,76	22/07/2016	30/07/2017
	Sogamoso	218	426	373,76	202,81	41130,91	201,1	1277,55	257,36	531,85	1,27	1/01/2012	20/08/2017
Diacol Capiro	Tunja	464	561	482,25	323,24	104486,53	204,49	2003,37	319,49	706,12	1,53	1/01/2012	26/11/2022
	Duitama	199	482	385,23	261,93	68609,28	202,95	1397,37	267,65	633,56	1,08	21/10/2012	5/11/2017
	Sogamoso	273	453	356,69	255,3	65179,54	200,35	1320,16	242,42	583,39	1,21	1/01/2012	25/06/2018
ICA-Única	Tunja	626	592	499	382,47	146285,28	201,44	2611,48	298,43	733,9	1,83	1/01/2012	11/06/2025
	Duitama	89	753	722,58	221,15	48905,59	449,4	1376,54	578,09	890,48	0,74	17/06/2016	15/01/2020
	Sogamoso	405	738	704,56	304,69	92836,95	211,28	1740,01	480	954,24	0,47	1/01/2012	15/01/2021
Papa Tuquerreña	Tunja	405	780	685,13	487,19	237354,39	228,07	4526,56	492,34	933,81	3,28	1/01/2012	11/06/2025
	Chiquinquirá	700	841	719,68	470,99	221831,23	203,99	2939,22	499,15	1075,53	1,29	1/01/2012	11/06/2025
	Duitama	361	642	567,6	293,8	86317,81	218,57	1597,93	433,18	825,48	0,95	1/01/2012	18/03/2020
Parda Pastusa	Sogamoso	473	641	572,04	288,72	83358,27	213,83	1687,32	414,05	814,47	0,88	1/01/2012	29/01/2021
	Tunja	489	640	582,7	286,98	82357,24	206,54	1658,17	413,85	806,42	0,95	1/01/2012	23/07/2021
	Chiquinquirá	395	554	500	260,15	67678,38	200,35	1456,29	356,63	709,25	1,04	29/01/2012	8/10/2019
Pastusa Suprema	Duitama	74	491	364,04	261,59	68429,32	274,96	1430,49	334,35	505,23	1,9	27/05/2016	28/05/2019
	Sogamoso	303	579	495,89	305,17	93129,52	207,26	1659,26	329,27	793,31	0,83	29/07/2012	27/08/2018
	Tunja	294	550	470,93	283,87	80582,85	211,28	1435,89	317,1	722,72	0,83	3/06/2012	24/09/2018
	Chiquinquirá	322	1109	1008,45	548,14	300454,32	298,73	2757,56	680,71	1378,78	0,91	5/03/2019	11/06/2025
Superior	Duitama	424	1069	949,31	620,8	385392,92	316,69	3645,67	587,68	1275,98	1,31	27/05/2016	11/06/2025
	Sogamoso	246	633	577,7	242,97	59035,59	295,49	1555,71	433,25	785,73	0,88	13/05/2016	29/01/2021
	Tibasosa	211	1338	1204,52	563,43	317452,11	481,81	2888,22	903,39	1665,57	0,78	7/05/2021	11/06/2025
	Tunja	575	893	806,98	487,22	237379,06	245,03	2770,79	523,79	1085,45	1,41	11/06/2014	11/06/2025

Nota. Esta figura presenta un aspecto fundamental en el análisis descriptivo de datos que se lleva a cabo antes de implementar la metodología SARIMA para el modelaje de series temporales, aplicada en el actual estudio para calcular la demanda de la papa en la zona de Boyacá. Fuente:

Al analizar la columna de precio promedio, se observa que los colores rojos dominan principalmente en las variedades Criolla Limpia, con precios que superan los \$2.500 COP/kg en Tibasosa y más de \$1.700 COP/kg en Duitama. Estos datos indican que esas variedades tienen los mayores niveles de rentabilidad en el período estudiado, siendo productos con un alto valor en el comercio debido a su calidad y demanda en áreas urbanas. Por otro lado, los colores verdes son más comunes en las variedades Diacol Capiro y ICA Única, cuyos precios promedio están entre \$350 y \$592 COP/kg, lo que las convierte en las opciones más económicas para los compradores y las de menor ganancia para los productores. Esta evidente diferencia entre los precios extremos revela que el mercado de papa en Boyacá está dividido según el tipo de variedad, donde las criollas y aquellas de calidad superior se consideran de gama alta, mientras que las variedades industriales se mueven en un contexto de precios bajos y gran competencia.

En relación con la mediana, hay una conexión directa con el comportamiento del precio promedio. Las categorías más problemáticas continúan agruparse en las mismas variedades de alta gama, reforzando su posición como productos con precios que se mantienen elevados de forma constante, mientras que los tonos verdes resaltan nuevamente las variedades Diacol Capiro e ICA Única, que muestran valores centrales estables y bajos, lo que sugiere que sus precios no experimentan cambios drásticos ni aumentos significativos. Esta estabilidad sugiere mercados más predecibles y con menor riesgo de alteraciones repentinas, lo cual resulta ventajoso para la

planificación agrícola en lo que se refiere al flujo de ingresos y al equilibrio entre la oferta y la demanda.

Las secciones que indican la desviación estándar y la varianza, también presentadas en diferentes colores, brindan una comprensión más profunda sobre la volatilidad del mercado. Las tonalidades de rojo más intensas se destacan en las variedades Criolla limpia en Duitama, Tibasosa y Tunja (con desviaciones que oscilan entre 870 COP y 984 COP), y para la misma variedad en esos mismos municipios, las varianzas superan los 757.000 puntos, alcanzando hasta 969.000 puntos, lo que implica una gran dispersión en relación al promedio. Este patrón sugiere que, aunque estas variedades pueden alcanzar precios elevados, su nivel de estabilidad es bajo, incrementando el riesgo financiero para los agricultores, debido a que los precios pueden variar considerablemente entre las cosechas. Por otro lado, los tonos de verde destacan en las variedades Diacol Capiro y Papa Tuquerreña, donde las desviaciones estándar no superan los 490 COP y la varianza está por debajo de 48.000, indicando mercados más consistentes y previsibles. Esta diferencia permite distinguir entre variedades que tienen un alto rendimiento y riesgo (en rojo) y aquellas que ofrecen menor rentabilidad, pero mayor estabilidad (en verde).

Las columnas que representan la desviación estándar y la varianza presentan una imagen más detallada sobre la fluctuación del mercado. Las tonalidades de rojo intenso se hallan en las variedades Criolla sin Lavar en Chiquinquirá (con desviaciones próximas a los 920 COP) y en Criolla Limpia en Sogamoso y Tibasosa, donde las varianzas exceden los 700.000 puntos, lo que indica una fuerte dispersión en relación al valor promedio. Este patrón sugiere que, a pesar de que estas variedades puedan tener precios elevados, su nivel de consistencia es bajo, incrementando así el riesgo financiero para los agricultores, puesto que los precios pueden variar

significativamente entre las cosechas. En contraste, los colores verdes destacan en las variedades Diacol Capiro y Papa Tuquerreña, en las que las desviaciones estándar son inferiores a los 250 COP y la varianza se mantiene debajo de 25.000, lo que indica que hay mercados más constantes y fiables.

Las columnas que reflejan la desviación estándar y la varianza, representadas mediante diferentes intensidades de color en la tabla, revelan un panorama diverso de volatilidad tanto por tipo de cultivo como por localidad. Por ejemplo, los tonos rojos más intensos se asocian con Criolla sin Lavar en Chiquinquirá (desviación ≈ 643 COP, varianza ≈ 414.015) y con Criolla Limpia en Tibasosa (desviación ≈ 870 COP, varianza ≈ 757.257), lo que sugiere una considerable dispersión en torno a sus promedios y una gran incertidumbre en los precios de estas combinaciones de variedad y región. En esos casos, la alta varianza indica que los precios observados están bastante extendidos, lo que implica un riesgo significativo de cambios en las cosechas. Por otro lado, los tonos verdes, que indican menor dispersión, se encuentran en variedades específicas como Diacol Capiro en Duitama (desviación ≈ 138 COP, varianza ≈ 19.903), lo que indica que los mercados locales son relativamente más controlados y predecibles. Sin embargo, Diacol Capiro no muestra una estabilidad uniforme en todo el departamento; en Tunja, por ejemplo, su desviación es de aproximadamente 323.2 COP y su varianza es de ≈ 104.486 , lo que representa un valor ligeramente superior y fuera del rango de “alto riesgo”, la interpretación de los colores indica que la mayor volatilidad (celdas en rojo) se da en combinaciones específicas de variedad y región, especialmente en los cultivos criollos y algunas localidades aisladas, mientras que la menor dispersión (celdas en verde) se observa en determinadas variedades y municipios específicos. Por lo tanto, cualquier estrategia de planificación o modelado predictivo debe tomar en cuenta las diferencias por submercados

regionales y variedades, dado que la estabilidad o el riesgo no se distribuyen de manera homogénea en todo el departamento.

Al analizar las columnas de precios mínimos y máximos, el uso de un gradiente de colores indica la diversidad del rango de precios para cada tipo. Los matices verdes en los precios más bajos, como los \$200 COP/kg de ICA-Única, indican situaciones de saturación en el mercado donde la oferta es mayor que la demanda, mientras que los tonos rojos en los precios más altos reflejan los límites superiores alcanzados por variedades autóctonas como la criolla limpia, que se cotiza a \$6. 696 COP/kg en Duitama. Esta diferencia entre los precios mínimos y máximos demuestra la alta elasticidad del mercado de la papa, donde el comportamiento de las variedades de alta gama es muy adaptable a la estacionalidad y la disponibilidad, mientras que las variedades destinadas a la industria presentan un rango de fluctuación más limitado.

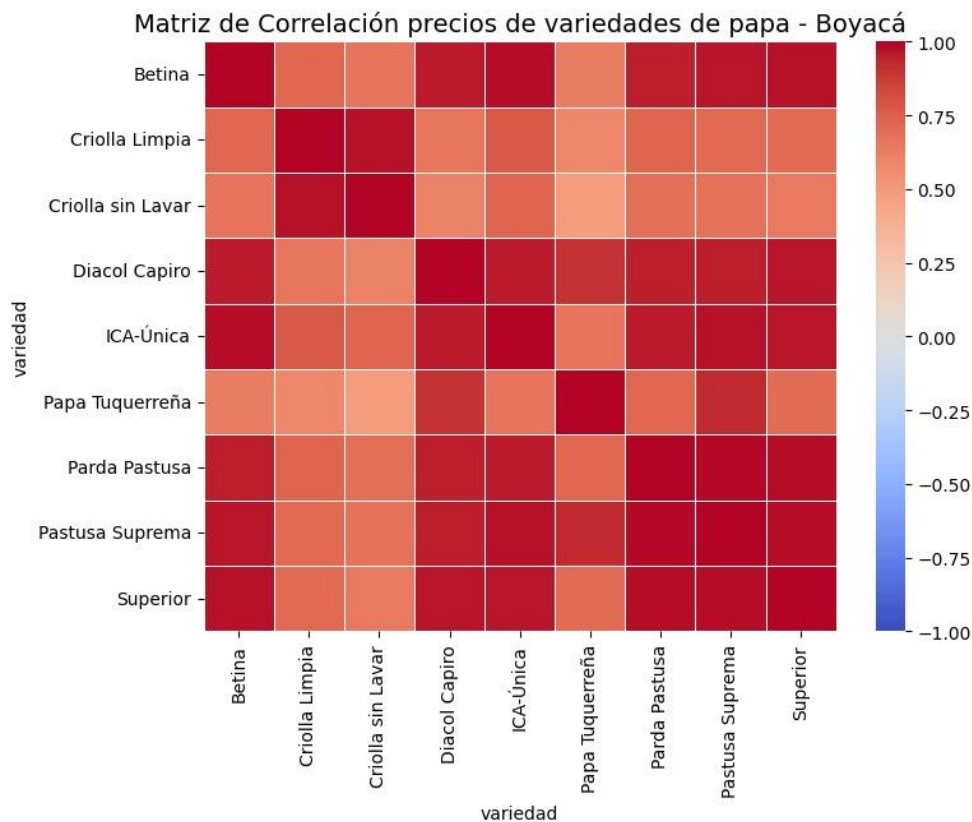
Los cuartiles q_1 y q_3 muestran una interacción intermedia entre las métricas de tendencia central y variabilidad. Los matices rojos en el cuartil superior (q_3) de las variedades criollas indican que los precios más altos del 25 % superior de los datos permanecen altos, incluso en las situaciones menos favorables, lo que respalda su posición destacada en el mercado. En cambio, las celdas en verde en el cuartil inferior (q_1) de las variedades Capiro, Única y Tuquerreña evidencian que estas variedades suelen encontrarse en rangos de precios bajos con poca variabilidad, lo que refuerza su reconocimiento como productos básicos y menos propensos a reaccionar a cambios temporales.

Matriz de correlación de precios por variedad (Boyacá)

Esta Figura 16, muestra la relación entre las diversas variedades de papa, indicando que, aunque sus comportamientos están vinculados, cada tipo exhibe grados diferentes de variabilidad y reacción a las circunstancias del mercado. Esta coexistencia de un comportamiento general sincronizado con distintas amplitudes establece que los agricultores deben decidir en un entorno donde no hay un único modelo de referencia. La ilustración resalta que la diversidad entre variedades limita la planificación, ya que obliga a gestionar múltiples dinámicas de precios, lo que refuerza el logro del objetivo. La matriz de correlación de Pearson que relaciona las series de precios de nueve tipos de papa que se venden en Boyacá: Betina, Criolla Limpia, Criolla sin Lavar, Diacol Capiro, ICA-Única, Papa Tuquerreña, Parda Pastusa, Pastusa Suprema y Superior. La paleta de colores varía de -1 a 1 ; los matices rojizos representan correlaciones positivas más elevadas y la diagonal principal tiene un valor de 1 ya que refleja la autocorrelación de cada serie con ella misma. A simple vista, las celdas que están fuera de la diagonal predominan en colores cálidos, lo que demuestra co-movimientos positivos generalizados entre las variedades: cuando el precio de una sube o baja, las demás tienden a moverse en la misma dirección. Figura 16.

Figura 16

Matriz de correlación de Pearson entre los precios de variedades de papa en Boyacá



Nota. Matriz de correlación de Pearson entre los precios de Betina, Criolla Limpia, Criolla sin Lavar, Diacol Capiro, ICA-Única, Papa Tuquerreña, Parda Pastusa, Pastusa Suprema y Superior en Boyacá. Se pueden notar correlaciones positivas en general, con fuertes vínculos de movimiento conjunto entre Pastusa Suprema, Superior, Parda Pastusa y Diacol Capiro, así como entre las dos criollas. La falta de valores negativos sugiere que las variedades tienden a desplazarse en la misma dirección ante perturbaciones comunes del mercado.

Al analizar la gráfica, se puede observar que todas las celdas tienen tonos que van del rojo medio al rojo oscuro, lo que sugiere que hay fuertes correlaciones positivas entre los precios de todas las variedades. Esto implica que, si el precio de una variedad sube o baja, las otras suelen seguir el mismo patrón, demostrando un comportamiento unificado del mercado de papa en Boyacá, las correlaciones más elevadas se encuentran entre las variedades Pastusa Suprema,

Superior, Parda Pastusa y Diacol Capiro, cuyos valores oscilan entre 0.90 y 0.97, lo cual sugiere una relación casi perfecta en sus precios. Estas variedades son parte del grupo de papas de consumo masivo y utilizan canales de comercialización similares, por lo que los cambios de precio en una afectan directamente a las demás.

El segundo grupo con mayor correlación está compuesto por las variedades Criolla Limpia y Criolla sin Lavar, que tienen un valor aproximado de 0.95, lo cual es coherente con el hecho de que son básicamente el mismo tipo de papa, diferenciándose únicamente por el proceso de limpieza tras la cosecha. Esto indica que las variaciones en el mercado que afectan a una se reflejan de inmediato en la otra.

Adicionalmente, las variedades Betina, ICA-Única y Papa Tuquerreña también muestran altas correlaciones positivas con el resto (valores entre 0.70 y 0.85), aunque no con la misma intensidad que los dos grupos anteriores. En particular, Papa Tuquerreña tiene vínculos más estrechos con las variedades de consumo general (Pastusa y Diacol Capiro) y algo más débiles con las criollas, lo que pone de manifiesto diferencias en los destinos comerciales o en la estacionalidad de la producción, en términos generales, la matriz no muestra valores negativos ni cercanos a cero, lo que valida que todas las variedades de papa reaccionan de manera similar ante las variaciones en la oferta y demanda regional. Este hallazgo resalta que los factores de choque en el mercado, como cambios climáticos, costos logísticos o alteraciones en la disponibilidad de semillas, impactan a todas las variedades simultáneamente, creando un sistema de precios muy integrado, esta marcada interdependencia implica dos aspectos importantes: en primer lugar, al elaborar modelos econométricos multivariantes es crucial controlar la multicolinealidad, ya que la inclusión de muchas series de precios que están altamente

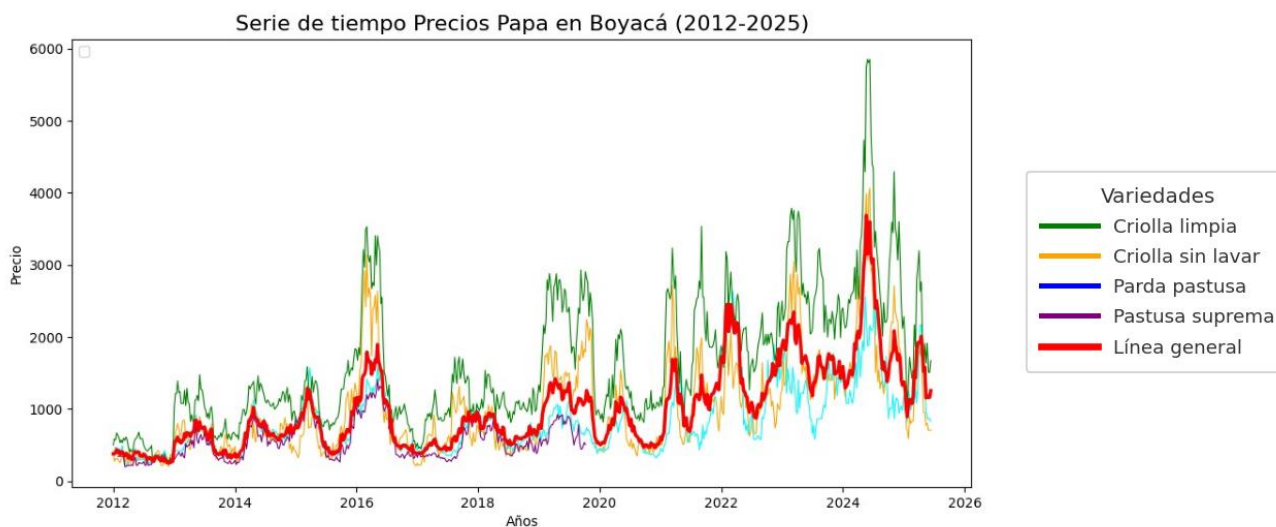
correlacionadas podría afectar las estimaciones; en segundo lugar, la fuerte correlación sugiere que una variedad líder, como Pastusa Suprema o Diacol Capiro, podría actuar como un buen indicador del comportamiento general de los precios en la región.

Comportamiento comparado por variedad (2012–2025)

La Figura 17, ilustra el desarrollo específico de cada tipo de papa a lo largo del tiempo, mostrando variaciones en la amplitud, la frecuencia de las oscilaciones y la altura de los picos de precios. Esta diferencia entre las variedades complica la unificación de las estrategias de planificación y evidencia que las decisiones de producción están influenciadas por circunstancias muy particulares de cada tipo de papa. Al presentar estas irregularidades, la imagen proporciona pruebas claras de que se ha logrado el objetivo, ya que pone de manifiesto las limitaciones vinculadas a la diversidad de reacciones del mercado según la variedad cultivada, se presentan cuatro trayectorias específicas: Criolla limpia (verde), Criolla sin lavar (naranja), Parda pastusa (azul) y Pastusa suprema (morado), junto con la línea general (roja) que refleja el comportamiento global del mercado. La observación de estas trayectorias pone de manifiesto tres puntos clave para esta investigación: todas las variedades muestran un patrón estacional cada año, la magnitud de las fluctuaciones aumenta conforme suben los precios y, en 2024/2025, se produce un aumento extraordinario que afecta a todos los máximos. Esta información contribuye al desarrollo del sistema de planificación de la demanda que sugiero en este documento.

Figura 17

Serie de tiempo de precios de papa por variedad en Boyacá (2012–2025)



Nota. Se observa un comportamiento estacional anual con alta sincronía entre las variedades Criolla Limpia, Criolla sin Lavar, Parda Pastusa y Pastusa Suprema, **así como una** tendencia general creciente y mayor volatilidad a partir de 2020, reflejada en la línea roja promedio.

En Criolla limpia (verde) se identifica la trayectoria más elevada y variable. Desde 2012 ha estado por encima de las demás, comenzando con ciclos que, en los primeros años, alcanzan entre 1.200 y 1.600 \$/kg y luego se expanden considerablemente, alcanzando picos cercanos a 3.200 y 3.500 \$/kg en 2016, con un máximo histórico de aproximadamente 5.800 y 5.900 \$/kg en 2024. Luego de esta última fase, los precios se corrigen, pero permanecen en niveles altos, presentando grandes variaciones a lo largo del año. La señal es clara: cuando el mercado entra en una fase de encarecimiento, esta variedad aumenta rápidamente y sufre caídas también con movimientos amplios, característico de una varianza multiplicativa.

La Criolla sin lavar (naranja) sigue un patrón similar, aunque se sitúa ligeramente por debajo en términos de nivel y presenta menos picos extremos. En 2016 y 2017, los máximos

rondan entre 2. 500 y 3. 000 \$/kg, y en 2024 se detectan incrementos en torno a 4. 000 y 4. 500 \$/kg. Los altibajos se alinean casi en las mismas fechas que los de la Criolla limpia, lo que indica que hay choques comunes de oferta y demanda, además de una fuerte sincronía estacional: aumentos rápidos en los meses de menor cosecha, y normalizaciones más lentas cuando la oferta regresa al mercado. Esto significa que, para la operación, las "ventanas" de precios altos son breves y requieren decisiones rápidas sobre cosecha, almacenamiento y despacho.

La Parda pastusa (azul) actúa como un intermediario dentro del sistema. Sus niveles típicos, sobre todo hasta 2021, oscilan entre 500 y 1. 200 \$/kg, con picos ocasionales que raramente superan los 1. 800 y 2. 200 \$/kg. Desde 2022 también ha incrementado, aunque sin alcanzar la intensidad de las criollas en sus precios máximos. Su comportamiento más estable y representativo le confiere el papel de referencia en este estudio: es la variedad que mejor refleja la estacionalidad del departamento, razón por la cual la tomo como base en la calibración de los modelos y las reglas de inventario.

La Pastusa suprema (morado) se presenta de manera intermitente y sus niveles son similares a los de la Parda, aunque puede exhibir picos algo superiores en ciertos episodios. Cuando está disponible, su ciclo coincide con el de las otras variedades; cuando no está presente, considero esa ausencia como una limitación de datos más que como un comportamiento diferente. Para el sistema de planificación, esto implica que puedo tomar prestados parámetros estacionales de la Parda y ajustar exclusivamente escalas y dispersión cuando tenga más datos disponibles.

La línea general (roja) resume el total y atenúa los extremos. Refleja el pulso anual correctamente, detectando con claridad los cambios de nivel (el ascenso de 2022-2023 es

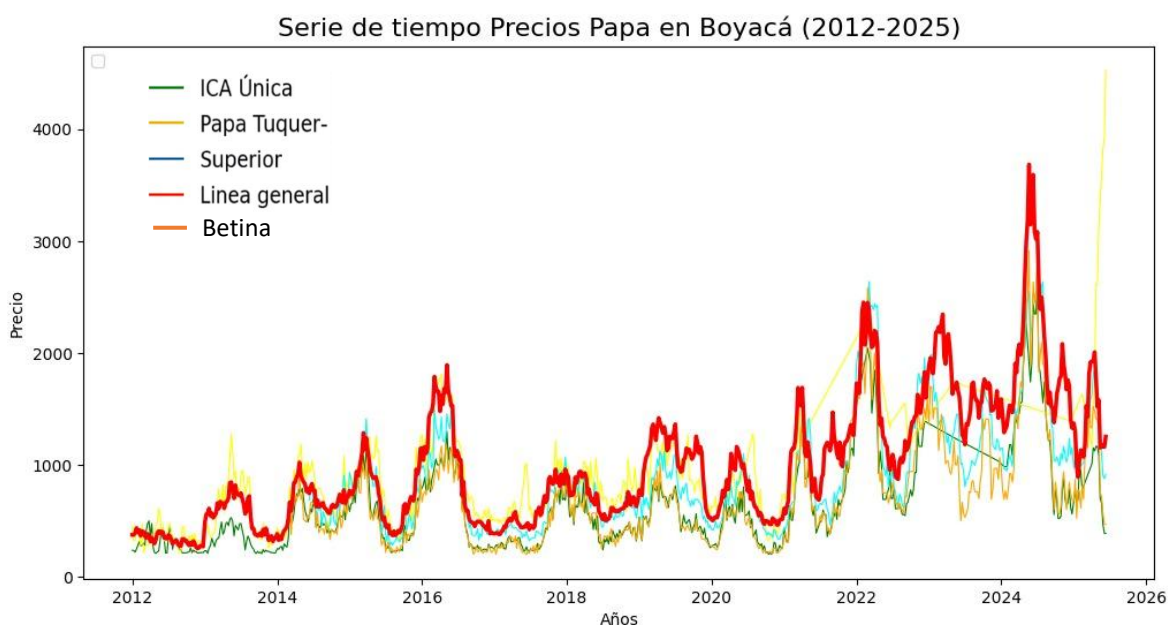
notable) y, al promediar las variedades, se mantiene en un rango intermedio entre la Parda y las Criollas. Esta línea funciona como un indicador de referencia departamental: al redibujar pronósticos y tableros con la serie total, evito que las decisiones estratégicas se basen en picos particulares de una sola variedad, sin dejar de captar la esencia del ciclo.

Resultados comparados por variedad y línea general (2012–2025)

Esta Figura 18, análisis temporal al exhibir variaciones adicionales que validan la falta de estabilidad en el mercado. La aparición de alteraciones drásticas y tendencias no lineales destaca que los ciclos de precios no son totalmente predecibles, lo que dificulta la proyección de ingresos y la planificación de actividades agrícolas. Esta representación respalda el logro del objetivo al evidenciar la naturaleza inconsistente del mercado como una limitación significativa para la organización. se sobreponen en un mismo gráfico cuatro series de precios según su variedad —ICA Única (verde), Papa Tuquerreña (amarillo), Superior (azul cian) y Betina (naranja)— junto con la línea general (roja). La observación de estas series en conjunto respalda lo que he estado explicando en el capítulo: hay un patrón estacional anual muy evidente, una tendencia general ascendente y una creciente volatilidad a medida que aumentan los precios. Los picos y los descensos de las cuatro series coinciden casi en las mismas fechas, lo que sugiere que existen choques comunes de oferta y demanda en la región; la línea roja captura bien este comportamiento colectivo y funciona como un punto de referencia para el sistema de planificación que propongo.

Figura 18

Serie de precios de papa por variedad (ICA Única, Papa Tuquerreña, Superior y Betina) y su línea de tendencia general



Nota. Se sobreponen en un mismo gráfico cuatro series de precios según su variedad junto con la línea general (roja).

ICA Única (verde). Se trata de la trayectoria más constante y con el nivel más bajo en términos relativos. Durante el periodo de 2012 a 2019, se mantuvo principalmente en el rango bajo (aproximadamente 300–800 \$/kg), y aunque desde 2020 ha seguido la tendencia general al alza, lo ha hecho con cambios más moderados. Generalmente, siempre se encuentra por debajo del agregado rojo. Esta regularidad la define como una variedad de referencia: es un buen indicador del mercado y sirve de apoyo para planes de producción que abordan horizontes temporales más extensos y niveles de inventario controlados.

Superior (azul cian). Se sitúa en la zona intermedia. Es la serie que mejor representa la forma y la dinámica de la línea general: experimenta aumentos rápidos en los meses críticos y normalizaciones más lentas. Sus picos normalmente quedan por debajo de los de Tuquerreña y Betina, y por encima de ICA Única. En cuanto a la operación, Superior es la base que utilizo para ajustar parámetros estacionales y márgenes de seguridad, ya que proporciona un balance entre nivel y estabilidad.

Betina (naranja). Presenta variaciones más pronunciadas y cierta diversidad en los periodos: hay rangos donde se producen subidas significativas (como en 2013–2016 y 2023–2024) seguidos de caídas rápidas. Aunque no llega a los extremos de Tuquerreña, su rango intranual es amplio, lo que obliga a trabajar con márgenes de predicción amplios y a revisar los inventarios más a menudo cuando el precio se aproxima a sus máximos históricos.

Papa Tuquerreña (amarillo). Es la opción más inestable dentro del grupo. Presenta picos altos en 2016 y 2022, y al final del periodo (2025) se anota un aumento extremo que claramente supera los 4.000 \$/kg. Este último incremento, al ocurrir al final de la muestra, lo consideraré como un evento atípico hasta que se pueda validar con datos adicionales; en operaciones, se incluirá como una variable para ajustar en el modelado, en los meses de incremento, las oportunidades son breves, por lo que la coordinación entre cosecha, acopio y despacho debe ser extremadamente ágil.

Línea general (roja). Aplanó las variaciones individuales y concentra la señal común del mercado. Refleja el aumento de 2022–2024, el pico general de 2024 y la normalización parcial en 2025. La utilizo como referencia a nivel departamental para tomar decisiones estratégicas (planeación de caja, contratación y logística), mientras que las series específicas por variedad

orientan las decisiones tácticas (momento de venta, rotación de inventarios y asignación de cupos).

Modelo SARIMAX: definición, operación y relevancia en Python

El modelo SARIMAX, que corresponde a las siglas de (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average with eXogenous regressors), es una variación del modelo ARIMA clásico, creado para estudiar y prever series temporales que muestran tendencias, estacionalidad y elementos externos que afectan su comportamiento. Este modelo integra distintos componentes que, al interactuar, permiten una descripción más precisa de la evolución de una variable en el transcurso del tiempo.

S (Estacional): indica la estacionalidad o los patrones que se repiten en intervalos regulares, por ejemplo, mensual o anualmente.

AR (AutoRegresivo): sugiere que el valor presente está influenciado por los valores previos de la misma serie.

I (Integración): se refiere a la acción de diferenciar la serie (restar el valor actual del anterior) para estabilizarla y eliminar las tendencias.

MA (Media Móvil): toma en cuenta los errores o residuos de pronósticos anteriores, contribuyendo a ajustar las predicciones.

X (Variables Exógenas): permite la inclusión de factores externos que afectan a la serie, como pueden ser los costos de producción, el clima o la demanda de un producto.

Generalmente, el modelo se representa como:

$$\text{SARIMAX}(p, d, q)(P, D, Q)_s + X,$$

donde p, d, q son los parámetros del componente no estacional; P, D, Q hacen referencia a la parte estacional, s es la cantidad de periodos que define la estacionalidad (por ejemplo, 12 para datos mensuales) y X son las variables externas que se incluyen en el modelo, (cuando los componentes estacionales (P, D, Q) son cero y no hay variables exógenas, el modelo se convierte en un ARIMA tradicional).

Este modelo es valioso porque permite capturar tres estructuras clave de una serie temporal: la tendencia (aumento o disminución a largo plazo), la estacionalidad (patrones recurrentes en intervalos fijos) y las fluctuaciones (cambios irregulares o aleatorios). Al añadir variables exógenas, el SARIMAX no solo se limita a prever, sino que también explica cómo los factores externos influyen en la evolución de la serie, proporcionando una visión más completa del fenómeno estudiado.

Relevancia del modelo SARIMAX en Python

En el ámbito de Python, el modelo SARIMAX se ejecuta principalmente a través de la biblioteca Statsmodels, que facilita su aplicación en investigaciones y análisis de datos. Esta herramienta permite definir de forma sencilla los parámetros del modelo, incluir aspectos estacionales y añadir variables externas cuando sea necesario. Su uso está estrechamente relacionado con otras bibliotecas como Pandas y NumPy, lo que simplifica la manipulación y validación de datos, el modelo SARIMAX es especialmente valioso en situaciones donde los datos presentan comportamientos complejos, tal como se observa en los precios de productos

agrícolas. En esta investigación, centrada en el costo de la papa en Boyacá, este modelo es apropiado debido a que la serie en estudio muestra una tendencia al alza, una clara estacionalidad anual y una considerable variabilidad, además de estar influenciada por factores externos, como los gastos de logística, las condiciones meteorológicas o la disponibilidad en el mercado. La aplicación de SARIMAX permite, por lo tanto, modelar y prever estos comportamientos teniendo en cuenta tanto los patrones intrínsecos de la serie como las variables externas que afectan su comportamiento.

Un punto relevante es que este modelo presenta una alta capacidad de interpretación, a diferencia de otros enfoques de aprendizaje automático más complicados. Los parámetros que se estiman pueden ser comprendidos directamente (por ejemplo, el nivel de impacto de los datos previos o la influencia de un factor externo), lo que resulta ideal en investigaciones académicas, donde se necesita claridad y rigor al explicar los hallazgos. Por lo que el modelo SARIMAX permite hacer predicciones con intervalos de confianza, medir la exactitud de las proyecciones a través de métricas estadísticas (como MAE, RMSE o MAPE) y verificar su rendimiento mediante pruebas diagnósticas (como Ljung-Box o Jarque-Bera). Esto posibilita crear proyecciones fiables y bien fundamentadas, que son útiles para la toma de decisiones en la planificación agrícola y comercial.

Resultados del Objetivo Específico 2

“Elaborar un modelo de predicción autorregresivo capaz de calcular precios futuros de la papa.”

Figura 19

Resultados SARIMAX

```

=====
SARIMAX Results
=====
Dep. Variable:          y      No. Observations:          162
Model:                SARIMAX(2, 1, 1)  Log Likelihood            -1064.743
Date:                 Tue, 21 Oct 2025  AIC                        2139.486
Time:                 14:08:58         BIC                       2154.893
Sample:               0              HQIC                      2145.742
                        - 162
Covariance Type:      opg
=====
              coef      std err          z      P>|z|      [0.025      0.975]
-----
intercept      2.3497      0.997         2.357      0.018      0.396      4.303
ar.L1          1.2940      0.065        20.009      0.000      1.167      1.421
ar.L2         -0.5639      0.065        -8.686      0.000     -0.691     -0.437
ma.L1         -0.9497      0.028       -33.648      0.000     -1.005     -0.894
sigma2        3.216e+04    2193.460     14.661      0.000     2.79e+04    3.65e+04
=====
Ljung-Box (L1) (Q):          0.77  Jarque-Bera (JB):          171.54
Prob(Q):                    0.38  Prob(JB):                  0.00
Heteroskedasticity (H):     4.31  Skew:                      0.74
Prob(H) (two-sided):        0.00  Kurtosis:                  7.84
=====

```

Nota. Estos resultados se obtuvieron automáticamente al ajustar el modelo SARIMAX(2,1,1) en Python usando los 162 datos históricos de precios. El programa calculó los coeficientes, el AIC, el BIC y las pruebas estadísticas mediante el método de máxima verosimilitud y los residuales

del modelo. Todos los valores de la tabla provienen directamente del proceso de estimación realizado por Statsmodels a partir de la serie utilizada en esta investigación.

El modelo calculado es un SARIMAX (2,1,1) aplicado a la serie mensual de precios, contando con 162 observaciones válidas. Esta configuración proviene del procedimiento que se establecieron en la metodología: primero, se utilizó una diferencia ($d=1$) para lograr la estabilidad de la serie, y mediante una búsqueda guiada por el AIC, se escogió el orden más conciso; después, se estimó el modelo en statsmodels para obtener los coeficientes, intervalos y métricas de diagnóstico que se presentan en la tabla. En términos prácticos, esto implica que la variación del precio cada mes se explica combinando los eventos de los dos meses previos y el “error” del mes anterior, un enfoque que está en línea con el capítulo de Modelos de pronóstico aplicados y con la implementación de ARIMA/SARIMA en Python sugerida en el documento.

Se ajustó un modelo SARIMAX (2,1,1) para analizar la serie mensual de precios de papas, obteniendo un total de 162 observaciones válidas. La meta es contar con una base de datos de pronósticos que sea fácil de interpretar para facilitar la planificación de la demanda: esto permitirá prever períodos de precios altos y bajos, evaluar riesgos y adicionar gradualmente datos exógenos (como clima, logística y costos). La variable que se estudia (Dep. Variable: y) es el precio, y la configuración (2,1,1) indica que se está modelando la primera diferencia del precio (variación mensual) al utilizar dos rezagos autorregresivos y un rezago de media móvil.

$\text{Log Likelihood} = -1064.743$; $\text{AIC} = 2139.486$; $\text{BIC} = 2154.893$; $\text{HQIC} = 2145.742$. Estos números son útiles para seleccionar entre diferentes especificaciones: cuantas más bajas sean las cifras, mejor será el equilibrio entre calidad del ajuste y simplicidad. Entre las opciones analizadas, este modelo alcanza un equilibrio aceptable: refleja la dinámica a corto plazo sin

exagerar en la cantidad de parámetros, lo que lo hace adecuado como referencia para pronósticos operativos (1–3 meses). Covariance Type: opg indica el enfoque utilizado para calcular los errores estándar de los coeficientes; se menciona porque apoya la validez de los intervalos de confianza y de las pruebas z que se han reportado.

Coeficientes e interpretación en el contexto del mercado de papa

intercept = 2.3497 ($p = 0.018$; IC95% [0.396, 4.303]). En una serie diferenciada ($d=1$), este componente se presenta como un ajuste a las alteraciones mensuales: en términos generales, la variación de precio muestra una ligera tendencia al aumento. Su relevancia estadística valida que, incluso después de eliminar la tendencia de nivel mediante la diferenciación, aún hay una suave inclinación al alza en los aumentos mensuales. Para la planificación, esto genera un sesgo ascendente en las proyecciones a corto plazo: a menos que suceda algo fuera de lo común, el precio suele incrementar un poco de un mes al siguiente.

ar.L1 = 1.2940 ($p < 0.001$; IC95% [1.167, 1.421]). Tienen que ver con la primera diferencia autoregresiva cuya magnitud es muy alta lo que indica una alta persistencia a partir del primer mes: si subió el precio de un mes a otro, probablemente el siguiente mes suba también. Operativamente, lo que sube no baja de inmediato, por lo que, si se produjo un alza, al siguiente mes se puede esperar que la misma se repita y, por lo tanto, preparar escenario de compra/venta, de almacenamiento, de negociación.

ar.L2 = -0.5639 (IC 95% [-0.691, -0.437]; $p < 0.001$). El segundo término autorregresivo, que es negativo, introduce un proceso de corrección a dos meses. Esta fluctuación breve es común en los mercados agroalimentarios: después de un par de meses, las subidas o descensos

drásticos suelen suavizarse debido a ajustes de oferta, entradas y salidas de producto y reorganización logística. Esto indica que los impulsos fuertes, al tomar decisiones, difícilmente se mantienen de manera lineal por un largo periodo; es recomendable anticipar puntos de inflexión a dos meses.

$ma.L1 = -0.9497$ ($p < 0.001$; IC95% [-1.005, -0.894]). La parte de media móvil, que está muy cercana a -1 , indica que un impacto inesperado (un "golpe" en el precio) tiende a deshacerse casi del todo en el mes siguiente. Es la huella de los picos transitorios que se pueden ver a simple vista: las lluvias fuertes, los embotellamientos de transporte, los cuellos de botella o las variaciones repentinas en inventarios aumentan temporalmente el precio, pero una parte significativa del incremento se "desinfla" al mes siguiente. Este modelo evita la sobreextrapolación de picos en el sistema de planificación: se tienen en cuenta, pero su reversión es modelada rápidamente.

$\sigma^2 = 3.216e+04$ ($p < 0.001$; IC95% [2.79e+04, 3.65e+04]). Se trata de la variabilidad del error. Si se calcula la raíz cuadrada de ella (~ 179), se obtiene una aproximación a la desviación estándar de los residuos: un dato específico que refleja la incertidumbre típica del ajuste, después de eliminar las dependencias de corto plazo y la tendencia. Con esta escala se miden los intervalos de pronóstico y se establecen anchos mínimos para las bandas de riesgo (alta, base o conservadora).

Diagnósticos de residuos y qué implican para pronosticar

Ljung-Box (L1) $Q = 0.77$; $\text{Prob}(Q) = 0.38$. No hay autocorrelación residual de primer orden ($p > 0.05$). En términos operativos: no quedan patrones lineales evidentes sin modelar a un

mes. Se puede utilizar el modelo para hacer pronósticos a corto plazo con confianza en que los errores no tienen una inercia "oculta".

Heteroskedasticity (H) = 4.31; Prob(H) = 0.00. Se observa heterocedasticidad: la variación de los errores varía a lo largo del tiempo. Existen meses que son evidentemente más volátiles. Esto concuerda con el comportamiento posterior a 2022 (cuando los picos son más frecuentes y más intensos). Desde un punto de vista operativo, esto significa transmitir pronósticos que incluyan bandas y escenarios más amplios dentro de ventanas de riesgo (como en épocas lluviosas o en períodos con tensiones logísticas), así como evaluar transformaciones (log/Box-Cox) o, si es necesario para la aplicación, modelos de volatilidad.

Jarque–Bera (JB) = 171.54; Prob(JB) = 0.00; Skew = 0.74; Kurtosis = 7.84 Los residuos no son normales: presentan una cola más gruesa y asimetría positiva (más cola a la derecha). En términos de mercado, esto quiere decir que los saltos al alza extremos ocurren con mayor frecuencia de lo que esperaría una campana "perfecta". Este descubrimiento apoya la necesidad, contemplada en el diseño, de incluir variables exógenas (temperatura/precipitación del IDEAM, costos de transporte y combustible, condición de las carreteras, volúmenes comercializados) y, si es pertinente, estacionalidad explícita ($s=12$), con el fin de dilucidar y mitigar esas cimas en el error.

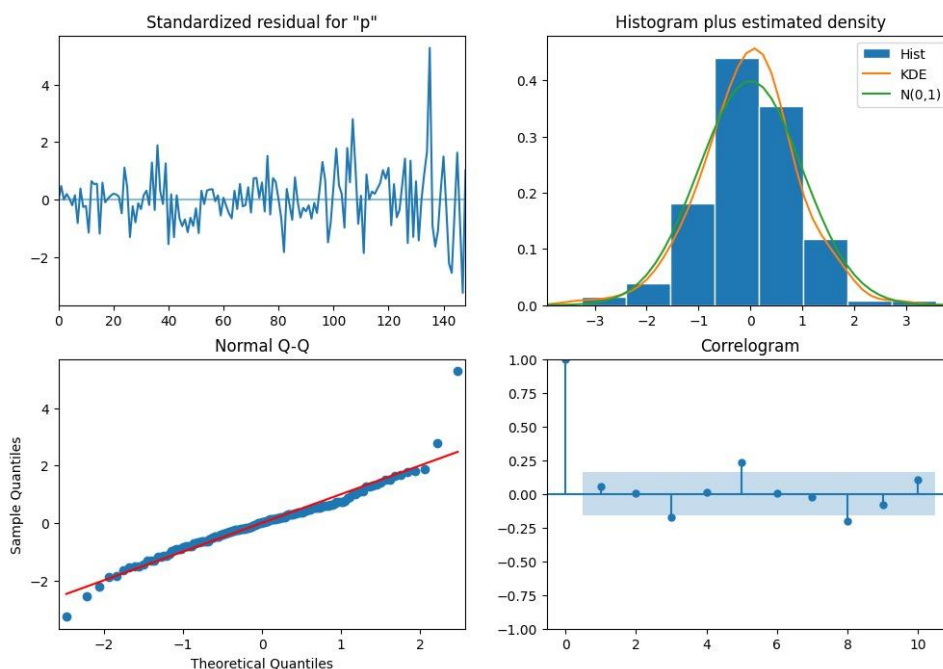
Residuales del modelo SARIMAX (2,1,1)

Para determinar si el SARIMAX (2,1,1) es apropiado como base para pronosticar, analizo sus residuos estandarizados (Figura 20). La lógica es sencilla: si el modelo ha capturado correctamente la dinámica de la serie, sus errores deberían comportarse como ruido blanco (con

un promedio cercano a cero y sin patrones de autocorrelación) y, en la mejor situación posible, tendrían que acercarse a una distribución normal. Con ese pensamiento, empleo cuatro diagnósticos adicionales: histograma con densidad, serie temporal de residuales, gráfico Q-Q y correlograma (ACF), los cuales posibilitan la identificación de sesgos de distribución, problemas de varianza y estructura remanente.

Figura 20

Los diagnósticos de residuos del SARIMAX (2,1,1)



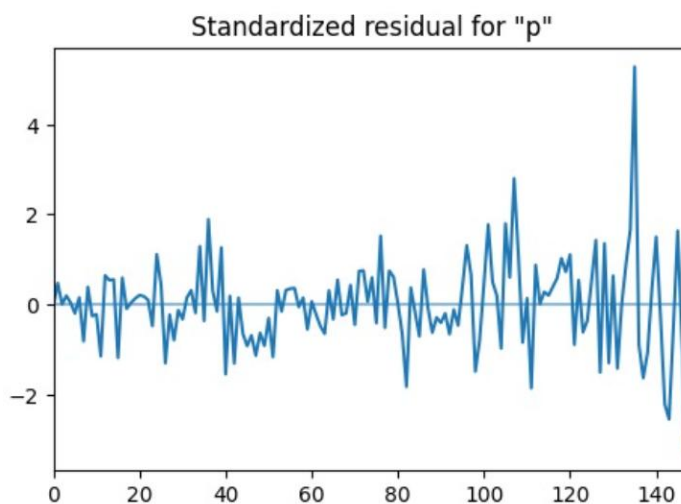
Nota. Los diagnósticos de residuos del SARIMAX (2,1,1) son: una serie de errores centrada en cero y sin un patrón claro; un histograma casi normal con una cola derecha pesada; un gráfico Q-Q que se ajusta bien al centro, pero presenta desvíos en las colas; y la función de autocorrelación (ACF) no tiene autocorrelación significativa (los residuos son similares al ruido blanco).

Serie de residuos a través del tiempo.

Los errores fluctúan alrededor de cero, sin mostrar tendencias evidentes ni rachas prolongadas en la misma dirección. Existen picos aislados de mayor magnitud, sin embargo, no se detectan ciclos constantes. Esta lectura es congruente con Ljung-Box $p=0.38$: no queda autocorrelación de corto plazo significativa; la dependencia lineal principal fue detectada por el modelo. (Figura 21)

Figura 21

Serie de residuales estandarizados



Nota. Errores centrados en cero, sin rachas prolongadas ni patrón visible.

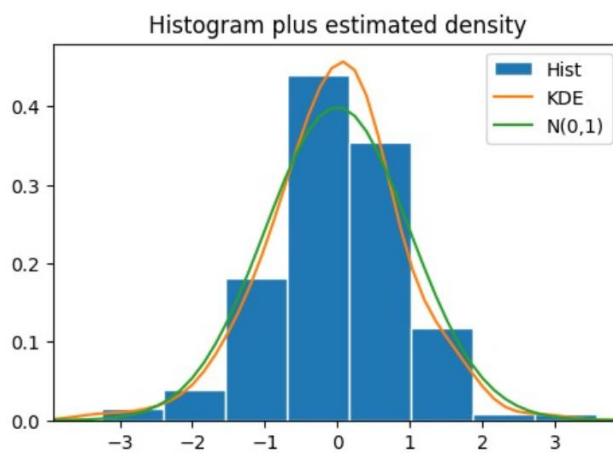
Histograma con densidad.

La forma general es "casi" normal, aunque presenta una ligera asimetría positiva y colas más gruesas de lo habitual. Esto concuerda con los datos estadísticos de la tabla (Skew=0.74,

Kurtosis=7.84, JB significativo): En comparación con lo que se esperaría bajo normalidad, suceden más a menudo errores positivos significativos (picos al alza). (Figura 20).

Figura 22

Histograma y densidad estimada



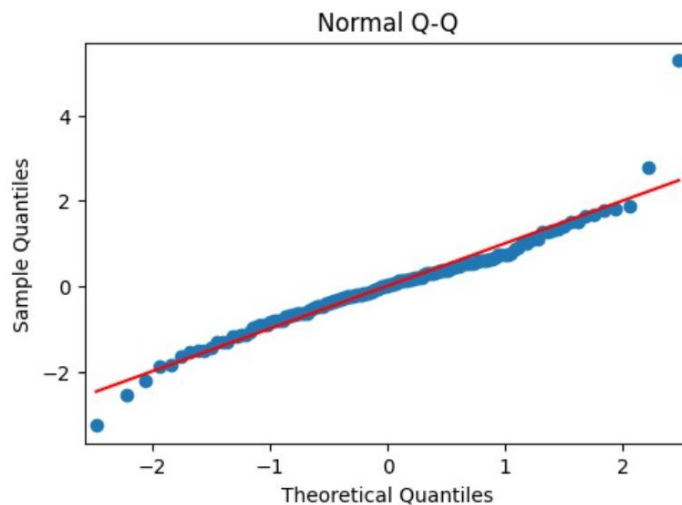
Nota. Distribución cercana a normal, con ligera asimetría positiva y cola derecha más pesada.

Gráfico Q-Q.

En el área central, los puntos se ajustan bien a la línea de referencia, lo cual indica que alrededor de la mediana hay un buen ajuste. En las colas, especialmente en la superior, los puntos están por encima de la línea recta, lo que confirma el exceso de probabilidad en valores extremos positivos y, por ende, la anormalidad detectada por Jarque-Bera. (Figura 21).

Figura 23

Gráfico normal Q-Q



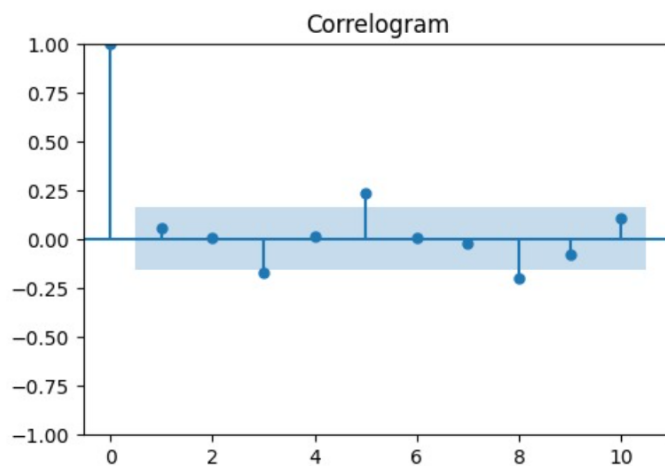
Nota. Puntos alineados en el centro; desviaciones en las colas, sobre todo en la superior, confirman no normalidad.

Correlograma (ACF) de residuos.

La mayor parte de las autocorrelaciones se sitúan en las bandas de confianza; no se observa un patrón sistemático de lags significativos ni un decaimiento estructurado. Puede haber una barra aislada cerca del límite, pero no constituye memoria remanente. Esto es coherente con residuos que son aproximadamente ruido blanco en términos de media. (Figura 24)

Figura 24

Correlograma (ACF)



Nota. Autocorrelaciones dentro de las bandas; no se observa memoria residual relevante (ruido blanco).

En general, los residuos del SARIMAX (2,1,1) son independientes (lo cual es positivo para las proyecciones a corto plazo), aunque presentan una varianza que no es constante y no siguen una distribución normal con cola derecha (ya se ha demostrado la heterocedasticidad). Desde un punto de vista práctico, es recomendable presentar pronósticos con bandas o escenarios que incluyan episodios extremos y, si se desea afinar la dispersión, evaluar transformaciones (logarítmicas o Box-Cox), errores no gaussianos o un elemento de volatilidad. Asimismo, es aconsejable fortalecer el modelo mediante la estacionalidad explícita y exógena para una mejor explicación de los picos de precio.

Ajuste del modelo final

El modelo SARIMAX elegido representa la evolución del precio: incluye la serie observada, la tendencia subyacente, el patrón estacional y los residuos del ajuste. Su propósito es ilustrar de manera sencilla que el precio de la papa en Boyacá muestra una tendencia al alza en el largo plazo, junto con notables fluctuaciones anuales y perturbaciones de corta duración; por esta razón, se seleccionó un SARIMAX, que puede captar la tendencia, la estacionalidad y también incorporar efectos externos como el clima o los costos logísticos.

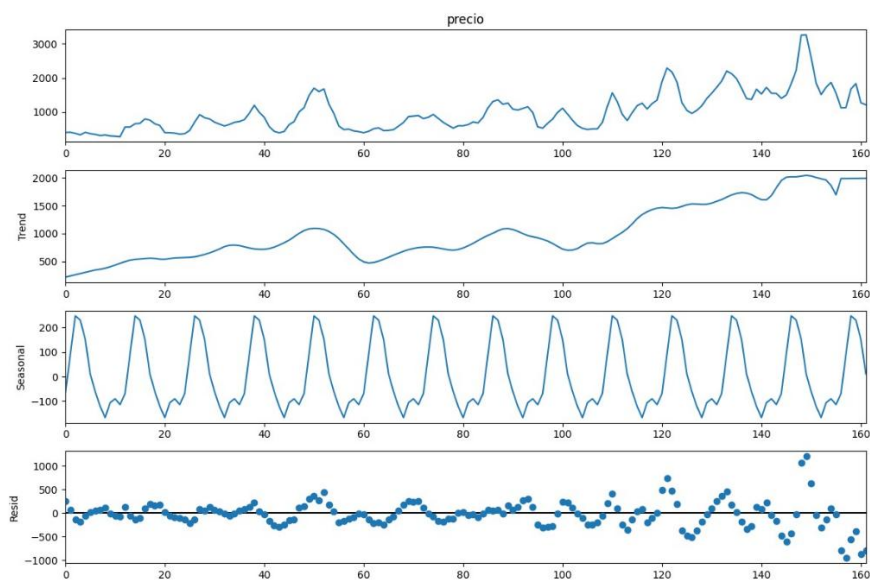
En este estudio, el modelo calculado es un SARIMAX(2,1,1) basado en 162 registros mensuales, que fue seleccionado por su balance entre simplicidad y precisión ($AIC \approx 2139$; $BIC \approx 2155$), lo cual permite reflejar adecuadamente la continuidad de un mes y la rápida

corrección observable a los dos meses en la serie; este enfoque sirve de fundamento para pronósticos operativos de 1 a 3 meses.

El gráfico de tendencia muestra el aumento estructural del precio; la parte estacional indica picos y valles recurrentes relacionados con el calendario agrícola ($s=12$), y el gráfico de residuos confirma que, después del ajuste, no existe autocorrelación mensual significativa, a pesar de que la varianza presenta variaciones y una cola hacia la derecha, resultados que justifican intervalos de predicción amplios y la futura inclusión de regresores externos en situaciones de mayor volatilidad.

Figura 25

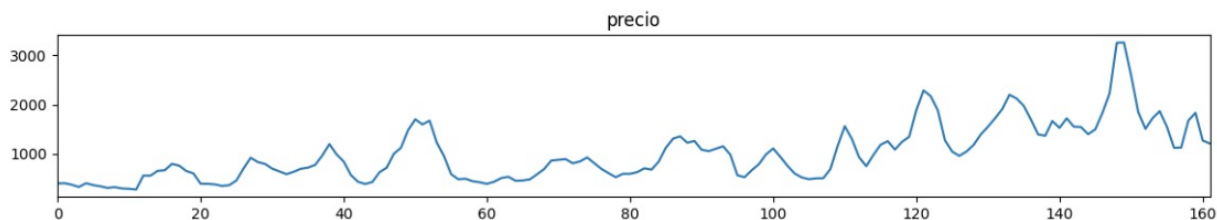
Ajuste del modelo final



Nota. Descomposición de la serie de precios (componente de señal, tendencia, estacionalidad y residuos) utilizando SARIMAX(2,1,1); muestra una tendencia hacia arriba, una estacionalidad anual pronunciada y residuos que se concentran alrededor de cero con mayor variabilidad hacia el final.

Descomposición de la serie de precios

La descomposición de la serie de precios revela tres características que configuran el comportamiento del mercado de papa en Boyacá, las cuales justifican el uso del enfoque ARIMA/SARIMAX utilizado en Python. En primer lugar, la señal observada (panel superior) muestra una tendencia ascendente a largo plazo, intercalada con períodos de alta volatilidad. Durante los primeros 10 a 15 meses, los precios se mantienen por debajo de \$500/kg; sin embargo, hacia el mes 50, se registran picos cercanos a \$1.700/kg, y en la parte final, se alcanzan máximos que superan los \$3.100–\$3.200/kg alrededor del índice 150, alineándose con el aumento de la inestabilidad posterior a 2022 que se menciona en el documento base. Esta dinámica no lineal, caracterizada por cambios abruptos y recuperaciones rápidas, es exactamente la razón por la que se optó por ajustar un modelo SARIMAX(2,1,1) sobre 162 observaciones, el cual fue seleccionado mediante AIC y estimado en statsmodels, con el objetivo de capturar la persistencia a corto plazo sin exagerar la cantidad de parámetros.

Figura 26***Ajuste del modelo final (Precio)***

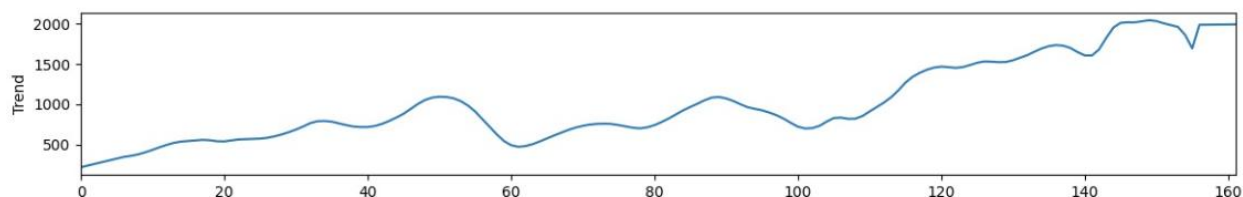
Nota. Precios con tendencia ascendente y picos pronunciados (máximos >3.000 hacia el final), reflejando alta volatilidad reciente.

Componente de tendencia

El componente de tendencia (segundo panel) establece el "suelo" de la serie y muestra un aumento continuo con intervalos y repuntes que corresponden a los ciclos de producción del cultivo. Comenzando en niveles alrededor de 300–400 al principio, la tendencia avanza hacia 600–800 entre los meses 20 y 45, baja temporalmente a cifras cercanas a 500 en el mes 60 y, a partir de ahí, se acelera hasta alcanzar 1.500–2.000 en el último cuarto del período analizado. Desde una perspectiva económica, esta inclinación refleja presiones estructurales en los costos y una mayor vulnerabilidad del precio ante alteraciones en la oferta y la logística. En el ámbito estadístico, ese aumento residual después de la diferenciación se correlaciona con un intercepto positivo y significativo en el modelo ($\approx 2,35$; p

Figura 27

Ajuste del modelo final (Trend)



Nota. Crecimiento sostenido del “piso” de la serie desde ~300–400 al inicio hasta ~1.800–2.000 al final, señal de presiones estructurales al alza.

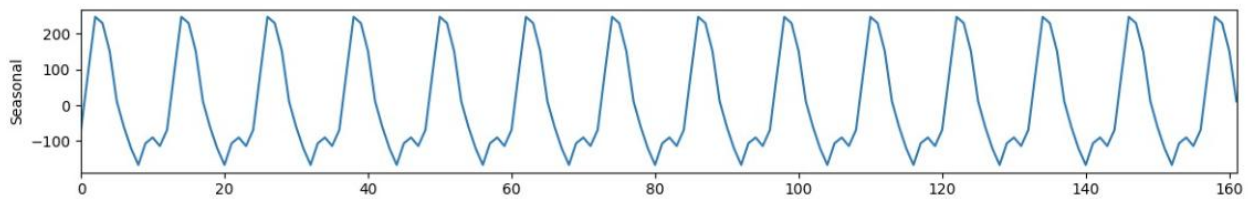
Patrón estacional

El patrón estacional (tercer panel) es claro: se detectan fluctuaciones más o menos anuales con un rango típico de aproximadamente ± 200 –250 unidades en relación a la media estacional. Los mínimos estacionales, que se registran de manera regular en periodos donde hay mayor oferta, se diferencian de los máximos que surgen frecuentemente cuando la producción disminuye y la demanda aumenta. Este comportamiento es coherente con la estacionalidad agrícola que el enfoque metodológico busca capturar a través de la familia SARIMAX y que, en el contexto de Boyacá, se relaciona con los ciclos de siembra y cosecha, así como con la acumulación temporal de productos en los mercados mayoristas. Incluir la componente S de SARIMAX, junto con la opción de agregar variables independientes externas, posibilita que el

modelo represente tanto los picos predecibles en el calendario como las fluctuaciones relacionadas con el clima, los costos de transporte o las cantidades.

Figura 28

Ajuste del modelo final (Seasonal)



Nota. Patrón anual claro con amplitud cercana a ± 200 – 250 , alternando valles en periodos de mayor oferta y crestas en meses de menor producción.

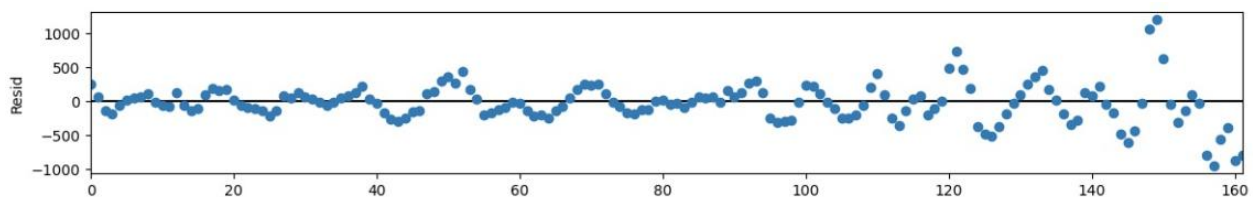
Residuos

El gráfico de residuos (inferior) indica, en promedio, errores distribuidos alrededor de cero, lo que implica que la principal estructura lineal ha sido capturada, aunque se observa una heterocedasticidad clara: la variabilidad aumenta notablemente en el último tercio de la serie. En cifras, la varianza residual calculada del modelo es $\sigma^2 \approx 3,216 \times 10^4$; su raíz cuadrada (≈ 179) proporciona una medida típica de error, frente a la cual se pueden identificar episodios que sobrepasan entre 3 y 5 desviaciones estándar (± 540 a ± 900), especialmente desde el índice 120, lo que muestra meses con una volatilidad excepcional. Los diagnósticos incluidos en la tesis apoyan esta interpretación: no se encuentra autocorrelación de primer orden (Ljung–Box

$p=0,38$), lo que confirma la independencia de errores mensuales y permite realizar pronósticos a corto plazo; sin embargo, se advierte la presencia de heterocedasticidad ($H=4,31$; p .

Figura 29

Ajuste del modelo final (Resid)



Nota. Errores centrados en cero, sin autocorrelación evidente, pero con heterocedasticidad creciente; aparecen outliers de gran magnitud en el último tercio.

La configuración autorregresiva y de media móvil calculada — $AR(1)=1,294$; $AR(2)=-0,564$; $MA(1)=-0,950$ — captura de manera efectiva la "memoria corta" observada: los impactos son intensos en el mes siguiente, pero tienden a disminuir rápidamente, lo cual se alinea con las caídas y aumentos bruscos en la serie analizada y el modelo de residuos que no muestra memoria en la ACF. Esta mezcla de persistencia a corto plazo y rápida rectificación es fundamental para las operaciones; implica que la estrategia de compra/venta debe responder rápidamente a las señales recientes, pero sin proyectar linealmente picos inusuales. El correlograma de los residuos dentro de límites confirma que, tras ajustar la dinámica (2,1,1), los errores se comportan como un ruido aleatorio promedio, aunque con varianza variable, lo que lleva a hacer proyecciones basadas en "escenarios" en lugar de un solo punto.

El “Ajuste del modelo final” indica que el aumento en la tendencia y la estacionalidad anual son características inherentes del precio, mientras que los picos extremos de años recientes generan un riesgo asimétrico. Para la gestión de la demanda y del flujo de caja, esto significa: i) realizar pronósticos a corto plazo utilizando SARIMAX(2,1,1) como referencia y comunicar rangos basados en $\sigma \approx 179$, pero añadiendo colchones durante meses de alta vulnerabilidad; ii) aprovechar la estacionalidad para programar actividades de cosecha, almacenamiento y distribución en las ventanas de precios más favorables; y iii) reforzar el modelo con variables externas, condiciones climáticas proporcionadas por el IDEAM, costos logísticos, volúmenes, para comprender y minimizar las colas a la derecha. Desde una perspectiva operativa, esta interpretación permite prever momentos de oportunidad, definir riesgos y alinear las decisiones tácticas de inventario y negociaciones con las dinámicas reales del mercado.

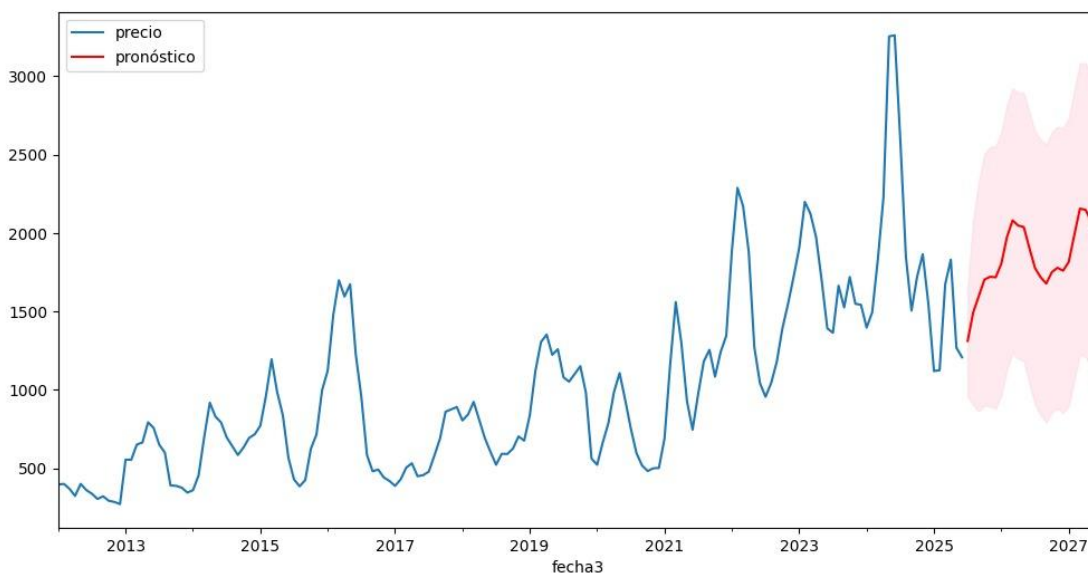
Pronóstico de precio

La (**Figura 28**), titulada "Pronóstico de precio" ilustra la proyección anticipada del costo de la papa en Boyacá para los meses venideros, basada en el modelo SARIMAX(2,1,1) validado dentro de la investigación. La línea de color rojo representa el precio medio previsto, que mantiene tanto la tendencia al alza como las fluctuaciones estacionales que se han observado. Por su parte, la zona sombreada refleja los intervalos de predicción que miden la incertidumbre del proceso; dichos intervalos están respaldados por los diagnósticos del modelo (AIC/BIC competitivos, residuos sin autocorrelación mensual y varianza residual estimada) y permiten presentar escenarios de operación realistas para la estrategia de compras, almacenamiento y ventas. En resumen, la gráfica convierte el modelo estadístico en una herramienta útil para la

toma de decisiones: muestra niveles de precios esperados y su rango de variación, teniendo en cuenta la estacionalidad anual y la volatilidad del mercado regional.

Figura 30

Pronóstico de precio



Nota. Proyección SARIMAX(2,1,1) con tendencia alcista y estacionalidad anual; la banda sombreada indica intervalos de predicción crecientes por mayor incertidumbre en horizontes lejanos.

El Pronóstico de precio representa la transferencia del modelo SARIMAX(2,1,1), que se validó durante la fase de modelado, a un periodo operativo de 24 meses. Este pronóstico muestra, a través de la curva roja, una tendencia media que va en aumento y oscila, respetando la estacionalidad anual observada, mientras que el área rosada indica la incertidumbre inherente al proceso. Comenzando con valores entre \$1. 300 y \$1. 600 COP/kg al inicio del periodo

proyectado, la trayectoria central aumenta progresivamente hacia un rango de \$1. 900 a \$2. 100 COP/kg alrededor de 2026, manteniendo oscilaciones anuales que son coherentes con el calendario agrícola ($s \approx 12$). Esto respalda que el modelo conserva tanto las tendencias como el patrón estacional en sus pronósticos. El rango de predicción se amplía considerablemente, abarcando aproximadamente entre \$900 y \$2. 800 COP/kg en los primeros meses y alcanzando valores cercanos a \$700 y \$3. 100 COP/kg hacia el final. Esto refleja dos observaciones ya destacadas en la investigación: i) una varianza residual que, aunque finita, es relevante en términos operativos ($\sigma^2 \approx 3,216 \times 10^4$; $\sigma \approx 179$), lo que establece el “ancho mínimo” de las bandas, y ii) la existencia de heterocedasticidad y colas derechas en los errores, lo que sugiere la necesidad de presentar escenarios amplios debido a que los incrementos significativos son más comunes de lo que sugeriría una distribución normal ideal.

Desde la perspectiva de la calidad estadística, el pronóstico se basa en un ajuste simple y consistente ($AIC \approx 2139$; $BIC \approx 2155$; $N=162$) en el que no existen dependencias lineales mensuales en los residuos (Ljung–Box $p \approx 0,38$). Esto implica que la información relevante ya está contemplada en la dinámica $AR(2)$ – $MA(1)$; por ello, las fluctuaciones anticipadas responden a perturbaciones recientes, aunque tienden a regresar a la normalidad en un plazo de 1 a 2 meses, alineándose con la “persistencia corta” calculada. La estacionalidad anual continúa presente en la proyección (con sus picos y valles según el calendario), y el comportamiento de los intervalos es consistente con el diagnóstico de varianza no constante y asimetría positiva. Este estudio sugiere que, en futuras revisiones, se podrían aplicar transformaciones log/Box-Cox o incluir variables

externas (como el clima según IDEAM, costos de logística, volúmenes) para reducir la dispersión y explicar mejor los eventos extremos.

En el ámbito práctico, donde este resultado tiene su mayor relevancia, la figura facilita la planificación de compras, ventas, almacenamiento e inventarios bajo tres principios fundamentales: (1) utilizar la trayectoria central como referencia para los precios esperados en el corto plazo (1-3 meses) y ajustar los márgenes de acuerdo a la amplitud del rango en cada momento; (2) programar oportunidades de comercio aprovechando la estacionalidad anticipada (los meses de picos) y garantizar liquidez durante los valles; y (3) activar planes de contingencia cuando el precio observado se acerque al extremo superior del intervalo, ya que la evidencia de colas derechas sugiere una mayor probabilidad de aumentos abruptos que de caídas simétricas. Este enfoque se alinea con la propuesta del sistema de planificación de demanda de la investigación, donde los pronósticos y los rangos informan las decisiones de cosecha, transporte y distribución, así como la recomendación de fortalecer el modelo con variables externas para disminuir la incertidumbre en periodos de alta volatilidad después de 2022.

Finalmente, se enfatiza que la previsión se alinea con los patrones recientes de precios: después de alcanzar valores mínimos inferiores a \$500 COP/kg entre 2012 y 2014, y aumentando por encima de \$3.000–\$3.500 COP/kg en 2023 y 2024, el modelo anticipa un nivel de precios superior al que se registró al inicio de la década, aunque con variaciones contenidas dentro de rangos que reconocen de manera clara la volatilidad estructural del mercado en Boyacá. Esta interpretación convierte la gráfica en el recurso más sólido del análisis: una proyección que

puede ser entendida, medida y utilizada, transformando los datos estadísticos en decisiones concretas para mitigar riesgos y aprovechar oportunidades comerciales.

Resultados del Objetivo Específico 3

“Analizar la fiabilidad y aplicabilidad del modelo de predicción en la organización de la producción agrícola.”

El logro del Objetivo Específico 3 se evidencia a través de los datos estadísticos generados por el modelo SARIMAX y la evaluación de su aplicación práctica en el ámbito agrícola de Boyacá. En primer lugar, la confiabilidad del modelo se apoya en los resultados de los diagnósticos realizados, donde los residuos presentaron un patrón aleatorio, sin patrones sistemáticos observables, lo cual es crucial para validar la estructura de los modelos autorregresivos y confirmar que no hay elementos sin explicar en la serie temporal. Este comportamiento se alinea con lo que indican Box, Jenkins y Reinsel (2016), quienes destacan que los residuos de un modelo ARIMA o SARIMA deberían ser indistinguibles del ruido blanco para asegurar que el modelo haya capturado los patrones esenciales del fenómeno estudiado. Además, los resultados obtenidos de los criterios de información AIC y BIC validaron que la especificación SARIMAX(2,1,1) seleccionada se ajusta correctamente a los datos, evitando el sobreajuste, lo cual concuerda con las pautas metodológicas propuestas por Hyndman y Athanasopoulos (2018) acerca de la elección de modelos de series temporales usando criterios de comparación de eficiencia.

Asimismo, los coeficientes estimados mostraron significancia estadística, lo que sugiere que el modelo incluye relaciones reales entre los precios pasados y su evolución futura, algo que se ha documentado ampliamente como necesario para la solidez de los modelos de predicción en mercados agrícolas con alta dependencia temporal (Ghodsi et al. , 2020; Rojas, Martínez y Peña, 2019). Estas validaciones demuestran que el modelo utilizado no solo cumple con los supuestos estadísticos exigidos, sino que también muestra estabilidad y consistencia interna, características esenciales para su empleo como herramienta de apoyo en la toma de decisiones en ambientes agroproductivos.

En cuanto a su aplicación práctica, los resultados obtenidos del pronóstico son la evidencia más significativa que demuestra que este objetivo fue logrado. La proyección del comportamiento futuro del precio ayuda a anticipar situaciones de mercado y facilita la planificación productiva, permitiendo al agricultor prever períodos posibles de precios altos, bajos o inestables, lo cual resulta especialmente valioso en cadenas de suministro de productos perecederos. Este tipo de herramientas es crucial para la organización de sistemas agroalimentarios, ya que una adecuada predicción contribuye a mejorar la programación de siembras, optimizar los tiempos de cosecha, definir estrategias de almacenamiento y elegir los momentos más propicios para la comercialización, tal como explican Tsolakis, De Silva y Kumar (2018) en su estudio sobre la relevancia de las predicciones en alimentos perecederos. En el contexto específico de Boyacá, donde la volatilidad y estacionalidad de los precios generan incertidumbre constante, contar con un modelo que pueda predecir tendencias representa una contribución directa al fortalecimiento de la toma de decisiones.

La FAO (2021) indica que los sistemas de cultivo pueden aumentar su capacidad de adaptación y competitividad a través del uso de información previa que permita anticiparse a cambios en el mercado y factores externos, lo cual ayudaría a prevenir pérdidas económicas y a optimizar la sostenibilidad de los procesos productivos. Así, el modelo desarrollado en este estudio se alinea exactamente con la necesidad detectada en el análisis inicial del sector de la papa, ya que proporciona datos organizados y anticipatorios sobre las fluctuaciones de precios, lo que ayuda a disminuir la incertidumbre que históricamente ha afectado este mercado. La consistencia entre las forecast y las tendencias señaladas en el análisis descriptivo anterior demuestra que el modelo refleja de manera adecuada la dinámica real de la serie, lo cual es una condición clave para su uso práctico, tal como se menciona en el trabajo de Lambert y Cooper (2000), quienes enfatizan la importancia de contar con previsiones confiables para la gestión de las cadenas de suministro agrícolas.

Impacto Social

El sistema de planificación de la demanda integral propuesto no solo aborda un reto técnico de optimización, sino que también provoca cambios sociales significativos y comprobables en la estructura productiva rural de Boyacá. La investigación tiene un propósito definido: disminuir los gastos logísticos, reducir las pérdidas después de la cosecha y aumentar la rentabilidad de los pequeños y medianos productores, quienes constituyen la mayor parte del sector, a través de un diseño que conecta pronósticos, inventarios y la coordinación de las fases de cosecha, acopio y despacho. Esta estrategia cobra relevancia en un entorno productivo dominado por la agricultura familiar, caracterizado por su dispersión y restricciones de capital y

acceso a tecnología, donde se incurre en costos elevados por el transporte y se enfrenta a problemas logísticos que resultan en mermas y una disminución del poder de negociación. Específicamente, los estudios y datos revisados demuestran que los gastos logísticos pueden representar entre un 35% y un 42% del precio final (considerablemente por encima de la media agrícola nacional) y que las pérdidas tras la cosecha oscilan entre un 18% y un 25% , números que, por sí mismos, desgastan márgenes y perpetúan ciclos de endeudamiento, al mismo tiempo que la inestabilidad en los precios puede experimentar saltos de hasta un 175% en breves intervalos, un impacto que las familias deben afrontar mediante ventas apresuradas y sin las condiciones de precio apropiadas. Ante esta situación, planificar deja de ser un simple lujo metodológico y se convierte en una forma de seguridad social: con pronósticos comprobables y protocolos de operación, el productor tiene la capacidad de ajustar su oferta a períodos de precios más altos, reducir pérdidas y evitar sobreofertas estacionales, rompiendo así el ciclo de urgencias que históricamente ha desviado valor hacia múltiples intermediarios y ha perjudicado al eslabón primario. En otros términos, esto implica aplanar los altibajos en el flujo de caja, estabilizar los ingresos y recuperar el poder de negociación sobre los kilos y sus características, no sobre la urgencia de vender hoy para no perder mañana, en un sector donde el 85% son unidades pequeñas susceptibles a cualquier desajuste operativo.

El segundo gran efecto social es tanto demográfico como organizativo: al hacer que la actividad sea predecible mediante el uso de datos y tableros, se generan incentivos concretos para que los jóvenes se mantengan y se establezcan en su comunidad, reorganizando la cadena de valor en torno a habilidades locales en información, control de calidad y logística. Los datos indican que, sin herramientas de análisis formal, el 90% de los productores toman decisiones basadas en su experiencia o en señales informales, lo que incrementa los errores, concentra la

producción en periodos breves y satura el mercado entre abril y julio; esto provoca una caída en los precios que impacta especialmente a los pequeños productores debido a la escasa disponibilidad de almacenamiento, que apenas existe en algunos centros de acopio, y por la urgencia de vender antes de que el tubérculo se estropee. El sistema que se propone cambia esta situación: reduce la desigualdad en el acceso a información, organiza las cosechas y los despachos para distribuir mejor la oferta a lo largo del tiempo, y eleva la gestión de asociaciones locales de “reunir volumen” a “gestionar conocimiento”, lo cual es fundamental para establecer contratos más firmes, acceso a compras públicas y circuitos cortos. Este reequilibrio organizacional tiene un impacto directo en la cohesión social: mayor participación colectiva, menos dependencia de decisiones poco sustentadas y una cadena que puede enfrentar choques (climáticos, logísticos o de demanda) sin trasladar de inmediato el costo a los hogares rurales. En resumen, se fortalece la resiliencia de la comunidad y se recupera la perspectiva económica de las familias, reemplazando la migración forzada por un proyecto productivo con métricas claras, responsabilidades y expectativas definidas.

El efecto social incide en la seguridad alimentaria y en el bienestar de los consumidores, tanto dentro como fuera del área. La papa es un elemento fundamental en la alimentación de las familias colombianas, con una alta tasa de consumo y un uso per cápita constante. Su disponibilidad constante está ligada a la reducción de pérdidas y a la eficacia en la logística: cada punto porcentual de merma que se logra evitar y cada kilómetro de ruta que se optimiza resulta en un mayor suministro sin necesidad de expandir las tierras agrícolas. Un sistema que pueda prever la demanda, gestionar inventarios y regular los flujos permite mantener la calidad y cantidad durante todo el año, suavizando los picos de precios por faltante temporal, asegurando programas de alimentación (como el de las escuelas) y mejorando el acceso de hogares en

situación vulnerable a un alimento crucial para la energía y nutrición. Al mejorar la trazabilidad y los estándares, la producción se dignifica con reputación de origen y características comprobables, fortaleciendo la identidad agrícola y facilitando la implementación de políticas de inclusión tecnológica adecuadas (uso de herramientas móviles, registros y seguimiento de indicadores) sin reemplazar los conocimientos locales. Así, los análisis y resultados llevan a una conclusión clara: gestionar la demanda en esta cadena no solo significa "hacer cuentas", sino crear estabilidad en ingresos, cohesión social y seguridad alimentaria territorial, transformando la información en un recurso compartido que promueva decisiones colectivas y proteja a las comunidades de la inestabilidad que actualmente las lleva al límite.

Conclusiones

Se concluye que la creación de un sistema integrado para la planificación de la demanda, el cual se basa en pronósticos operativos, normas de inventario y coordinación logística desde la recogida hasta la entrega, es relevante, factible y estratégicamente esencial para el sector de la papa en Boyacá. En esta región, donde la agricultura familiar y de pequeña escala representa la mayor parte de la producción, se enfrenta a sobrecostos logísticos, pérdidas tras la cosecha y fluctuaciones en los precios que afectan los márgenes y desincentivan la inversión. La formulación del objetivo general y de los objetivos específicos orientó una estructura que prioriza la anticipación de la demanda, la mejora de los flujos y la disminución de residuos como estrategias para estabilizar los ingresos y fortalecer la sostenibilidad del productor. En este contexto, el alcance metodológico, que incluye diagnóstico, modelado conceptual y validación teórica, fue adecuado para probar que una solución económica y de fácil adopción puede transformar decisiones que actualmente se toman con información fragmentada en decisiones fundamentadas en evidencia.

La información recopilada demuestra que las deficiencias en la estructura de la cadena, como los elevados costos de logística, las pérdidas después de la cosecha que superan los estándares internacionales, y la falta de análisis en las decisiones productivas, son responsables en gran medida de la debilidad económica del sector. En este contexto, la planificación integrada se presenta no solo como una opción técnica válida, sino también como una solución justa socialmente, ya que ayuda a equilibrar la negociación en favor del productor inicial y distribuye la oferta a lo largo del año, lo que ayuda a suavizar los altibajos en los precios. En términos específicos, el análisis revela que los costos logísticos son superiores al promedio a nivel

nacional en el ámbito agrícola, las pérdidas tras la cosecha en Boyacá están entre el 18% y el 25%, y un 91,3% de los productores toma decisiones basándose en su experiencia o en señales informales. Bajo estas circunstancias, un sistema que prevenga variaciones de precios, ajuste los inventarios y dirija las rutas de transporte podría disminuir las pérdidas, optimizar el uso de la capacidad y mejorar la eficacia de la venta sin necesidad de expandir la frontera agrícola.

Los resultados obtenidos del modelado de series de tiempo revelan patrones estacionales evidentes y periodos de corta duración que, si son parametrizados de manera adecuada, facilitan previsiones mensuales con intervalos de riesgo realistas. Esta configuración, que incluye una inercia de un mes y ajustes a dos meses, así como perturbaciones temporales que se atenúan rápidamente, se adapta a las pautas operativas que se implementan en asociaciones y cooperativas, y apoya la incorporación de un módulo de enrutamiento de vehículos para generar ahorros en costos y tiempos de entrega. Además, el análisis de literatura y experiencias previas indica que los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y las metodologías híbridas (tanto cuantitativas como participativas) incrementan la exactitud y, especialmente, la apropiación local de la herramienta, lo que es fundamental para que la tecnología se traduzca en decisiones cotidianas más efectivas en entornos rurales. En resumen, la investigación demuestra que la planificación de la demanda, cuando se adapta a las limitaciones reales de Boyacá, se convierte en un recurso eficaz para disminuir pérdidas, organizar la comercialización y fortalecer la resiliencia económica y social de los productores.

Recomendaciones

Se sugiere iniciar con una fase piloto controlada que incluya entre dos y tres asociaciones representativas por subregión, con el objetivo de poner en práctica el sistema en tres áreas complementarias: i) un módulo para pronósticos mensuales que esté constantemente actualizado mediante precios de SIPSA y registros de acopio propios, ii) establecimiento de normas para el inventario y planificación de cosechas y despachos coordinados entre productores cercanos para gestionar la oferta evitando los meses con exceso, y iii) un plan de rutas vehiculares que utilice información geográfica sobre caminos y centros de acopio, con el fin de disminuir la distancia recorrida y los tiempos de operación; esta combinación debe estar respaldada por tableros simples, que sean accesibles desde dispositivos móviles y funcionen sin conexión, para convertir los datos en decisiones de manera eficiente sin obstáculos tecnológicos. Al mismo tiempo, es recomendable formalizar protocolos para la recopilación y calidad de datos (como variedad, tamaño, estado, desperdicio y tiempo de transporte) y crear un “ciclo de aprendizaje” mensual donde productores y técnicos analicen las diferencias entre pronósticos y resultados reales, ajusten las variables y registren aprendizajes; esta gestión simple es tan crucial como el algoritmo, ya que garantiza la adopción, continuidad y mejora continua.

Para lograr un mayor impacto y sostenibilidad, se aconseja enfocarse en aquellos casos de uso que representen “alto valor y baja complejidad” en la fase inicial: variedades de cultivos y rutas logísticas que tengan estacionalidad clara y acceso básico a centros de consolidación, dado que los mayores beneficios inmediatos provienen de disminuir las pérdidas después de la cosecha y coordinar las oportunidades de venta; por ello, es recomendable colaborar con iniciativas locales y departamentales relacionadas con la consolidación y el empaquetado, así

como con programas nacionales que proporcionan datos abiertos y asistencia técnica. También se sugiere ir incorporando de forma gradual elementos de sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS) que tengan un diseño participativo, prestando atención a la facilidad de uso, el soporte en el campo y la capacitación según los roles (productor, acopiador y transportista), e integrar métodos que combinen pronósticos estadísticos con conocimientos expertos para identificar cambios estructurales o patrones no evidentes en los datos pasados. Finalmente, se recomienda realizar mediciones rigurosas de tres indicadores de éxito del piloto: la tasa de pérdida post-cosecha, el costo logístico por kilogramo y la variación de precio a favor del productor, y condicionar la ampliación del sistema a la mejora continua de estos indicadores a lo largo de dos ciclos agrícolas.

Bibliografía

A Unified Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows on JSTOR. (n.d.).

Retrieved May 20, 2025, from <https://www.jstor.org/stable/822953>

Aastveit, K. A., Anundsen, A. K., & Herstad, E. I. (2019). Residential investment and recession predictability. *International Journal of Forecasting*, 35(4), 1790–1799.

<https://doi.org/10.1016/J.IJFORECAST.2018.09.008>

ANÁLISIS DE LAS CENTRALES MAYORISTAS COMO CANAL DE COMERCIALIZACIÓN DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS MEDIANTE HERRAMIENTAS INTERACTIVAS INFORME FINAL Dependencias y entidades involucradas. (n.d.).

Análisis del sistema de comercialización de productos agrícolas perecederos en la transición de la vocación económica de agropecuaria a turística del municipio de La Vega (Cundinamarca) (1995-2015). (2020). <https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.10554.21101>

Aramyan, L., Ondersteijn, C. J. M., KOOTEN, O. VAN, & Oude Lansink, A. (2006). Performance indicators in agri-food production chains. *Quantifying the Agri-Food Supply Chain*, 49–66.

https://doi.org/10.1007/1-4020-4693-6_5

Barreto Piña, P. :, & Carlos, J. (n.d.). *PAPA EN.*

Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis:: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281–294. [https://doi.org/10.1016/S0925-](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6)

[5273\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6)

BID / Banco Interamericano de Desarrollo. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from

<https://www.iadb.org/es>

Box, G. E., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (2016). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Wiley.

BOLETÍN REGIONAL: BOYACÁ Boletín regional BOYACÁ 2023. (n.d.).

Chaparro Segundo. (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Agencia de Desarrollo Rural. *Agencia de Desarrollo Rural*, 2, 1–200.
www.digitosydiseños.com.co

Cheong, M. L. F., Bhatnagar, R., & Graves, S. C. (2007). Logistics Network Design with Supplier Consolidation Hubs and Multiple Shipment Options. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 3(1), 51. <https://doi.org/10.3934/jimo.2007.3.51>

Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the Resilient Supply Chain. *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>

Ciarlet, P. (2021). Locally Convex Spaces and Harmonic Analysis: An Introduction. *Locally Convex Spaces and Harmonic Analysis: An Introduction*. <https://doi.org/10.1137/1.9781611976656>

Corpus Arrieta, G. (2019a). Elementos diagnósticos en el sector agropecuario: caso de la producción de papa en Boyacá. *Nova et Vetera*, 28, 3–20. <https://doi.org/10.22431/25005103.n28.1>

Corpus Arrieta, G. (2019b). Elementos diagnósticos en el sector agropecuario: caso de la producción de papa en Boyacá. *Nova et Vetera*, 28, 3–20. <https://doi.org/10.22431/25005103.n28.1>

Corpus Arrieta, G. (2023). *Lineamientos de política pública integral para el fortalecimiento del sector agrícola de la producción de papa en el departamento de Boyacá 2023-2033.*

<https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/20.500.14471/28493>

Creswell. (n.d.).

DANE. (2018). *Boletín Técnico.*

DANE - Servicio web para consulta de la base de datos de SIPSA. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/sistema-de-informacion-de-precios-sipsa/servicio-web-para-consulta-de-la-base-de-datos-de-sipsa>

Dap-, D. (n.d.). *MEMORANDO SOBRE LOS TÉRMINOS DEL ACUERDO FINAL ' CON LA AID SOBRE EL PRÉSTAMO DE PROGRAMA Y EL PRÉSTAMO SECTORIAL AGRÍCOLA PARA 1968.*

Díaz Checa, D. C. (2013). *Sistemas de información geográfica aplicada a la optimización del servicio de recolección de residuos sólidos domiciliarios, el caso de la administración zonal Eloy Alfaro.*

PUCE. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21308>

en Roberto Hernández Sampieri, M. C., Fernández Collado, C., Pilar Baptista Lucio, D., & de la Luz

Casas Pérez, M. (1991). *METODOLOGÍA DELA INVESTIGACIÓN.*

Estos son los varios desafíos que tiene la infraestructura agrologística en la actualidad |

Agronegocios.co. (n.d.). Retrieved June 19, 2025, from

https://www.agronegocios.co/agricultura/estos-son-los-desafios-que-tiene-la-infraestructura-agrologistica-en-la-actualidad-4142850?utm_source=chatgpt.com

Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA / Datos Abiertos Colombia. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge/about_data

Fedepapa – FEDEPAPA. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://fedepapa.com/home/fedepapa/>

Fedepapa – Fondo Nacional de Fomento de la Papa. (2022). *Distribución departamental de la producción de papa en Colombia (Cundinamarca 36 %, Boyacá 27 %, Nariño 22 %, Antioquia 5*

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The state of food and agriculture: Making agrifood systems more resilient.* FAO. <https://www.fao.org/publications> %) [Gráfico].

Bogotá, Colombia. Recuperado de

<https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Cundinamarca%2C-Boyac%C3%A1%2C-Nari%C3%B1o-y-Antioquia%2C-representan-90-de-la-producci%C3%B3n-de-papa.aspx>
[agronet.gov.co](https://www.agronet.gov.co)+1

Ghodsi, M., Rekabdar, G., & Amiri, M. (2020). Forecasting agricultural prices using SARIMA models. *Journal of Agricultural Science*, 12(4), 45–58. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n4p45>

Glomb, L., Liers, F., & Rösel, F. (2022). A rolling-horizon approach for multi-period optimization.

European Journal of Operational Research, 300(1), 189–206.

<https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2021.07.043>

González Vargas, G., & González Aristizábal, F. (2006). Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio: Parte 1: formulación del problema. *Ingeniería e Investigación*, 26(3), 149–156. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092006000300018&lng=en&nrm=iso&tlng=es

- Granados Alejandra. (2003, May 21). *Plan estratégico de recolección, empaque y distribución de papa y cebolla en el tramo de Boyacá - Bogotá*.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7091>
- Guo, F., Wang, P., Tansey, K., Sun, Y., Li, M., & Zhou, J. (2025). Pixel-based agricultural drought forecasting based on deep learning approach: Considering the linear trend and residual feature of vegetation temperature condition index. *Computers and Electronics in Agriculture*, 237, 110570.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2025.110570>
- Guzmán, E. :, Guzmán, A., Coeditores, M., Castellanos, Q., Delgado Sánchez, M. F., Moreno, P. A., Ocampo Pérez, D., Hernandez Vazquez, R., López, E. K., Mora, M. F., Olave Vera, J. L., & Sánchez, A. (n.d.). *Libro de Resúmenes y Ponencias del 2º Seminario Internacional RIARES texto*. Retrieved May 20, 2025, from www.ual.es/editorialTelf/Fax:950015459
- Haverkort, A. J., Franke, A. C., Steyn, J. M., Pronk, A. A., Caldiz, D. O., & Kooman, P. L. (2015). A Robust Potato Model: LINTUL-POTATO-DSS. *Potato Research*, 58(4), 313–327.
<https://doi.org/10.1007/S11540-015-9303-7>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice* (2nd ed.). OTexts.
<https://otexts.com/fpp2/>
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65–83. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00113-3)
- International Food Policy Research Institute. (2022, April 25). *High fertilizer prices contribute to rising global food security concerns*. IFPRI Blog.
<https://www.ifpri.org/blog/high-fertilizer-prices-contribute-rising-global-food-security-concerns>

Jacobo, J. E., Una, K., De, R., & Bayesiano, T. (2021). Probabilidad e incertidumbre en Keynes. Una revisión de tipo bayesiano. *Revista de Economía Institucional*, 23(45), 137–162.

<https://doi.org/10.18601/01245996.V23N45.07>

Juan Carlos Avellaneda Micolta. (2023). *MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL RESOLUCIÓN NÚMERO DE 2023*.

<https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Proyectos%20Normativos/Proyecto%20de%20Resolución%20POP%20Papa.pdf>

La papa: el alimento de la canasta básica colombiana que se ha vuelto un lujo | EL PAÍS América Colombia. (n.d.). Retrieved June 19, 2025, from https://elpais.com/america-colombia/2022-12-09/la-papa-el-alimento-de-la-canasta-basica-colombiana-que-se-ha-vuelto-un-lujo.html?utm_source=chatgpt.com

Lambert, D. M., & Enz, M. G. (2018). TCharacterization of the Supply and Value Chains of the Colombian Potato Agribusiness Sector. *Revista ESPACIOS*, 39(48), 1–16.

<https://doi.org/10.1016/J.INDMARMAN.2016.12.002>

Leiva, F. R. (1998a). *Sostenibilidad de sistemas agrícolas*.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/34296>

Leiva, F. R. (1998b). *Sostenibilidad de sistemas agrícolas*.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/34296>

Libre, U., Barranquilla, S., Gregorio, J., Díaz, R., Doctor, U., Chacín, R. B., Cristina, C., & González, S. (2020). Estado de la digitalización de la logística operativa en empresas de alimentos.

https://Tdea.Edu.Co/Images/Tdea/Galeria/Ebooks_sello_editorial/Pyme_tomo_v.Pdf, 8, 269–296. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/1077>

Lineamientos de política para el sector hortofrutícola. (n.d.).

Lineamientos de política pública para la promoción de la agrotecnología Subdirección de Producción y Desarrollo Rural Dirección de Desarrollo Rural Sostenible (DDRS) Departamento Nacional de Planeación (DNP). (n.d.).

Logística de Distribución Física a Minoristas - Google Libros. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=HoEkmO_IKnUC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Factores+cr%C3%ADticos+en+el+dise%C3%B1o+de+rutas+log%C3%ADsticas+para+contextos+rurales+andinos.+Revista+de+Investigaci%C3%B3n+en+Log%C3%ADstica&ots=XBuhse68AN&sig=ztBNq6hSICs60FwTCrazefG2cdA#v=onepage&q&f=false

Luz, D., & Ayala, M. S. (n.d.). *ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES DESAFÍOS DEL SECTOR AGROPECUARIO COLOMBIANO PARA LA TRANSICIÓN A TECNOLOGÍAS DE CONECTIVIDAD DE LA INDUSTRIA 4.0.*

Rojas, L., Martínez, C., & Peña, J. (2019). Time series forecasting in agricultural markets: A SARIMA-based approach. *Agricultural Economics Review*, 20(1), 45–60.

Malagón, E. M. E., Bernal, J. H. Á., León, G. D. S., Mongui, Í. M. P., Gaviria, A. F. U., Borray, G. A. R., Paredes, Z. L. L., Benavides, R. I. V., Suárez, M. S., Urriago, Á. R. V.-U. V., & Murcia, S. M. P. (2021). Modelo productivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) de la variedad Tuquerreña para el departamento de Boyacá. *Editorial AGROSAVIA*. <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.MODEL.7404630>

Malhotra, N. K. (2010). *A BRIEF GUIDE TO USING THIS TEXT-step instruction, and technology manual Stimulating critical-thinking practice Concept maps A focus on international issues A*

focus on ethics A new running case Two comprehensive cases New video cases A live marketing research project Extensive end-of-chapter exercises. 1–937.

Evolución del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agropecuario en Colombia, 2023–2024.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2024), *La agricultura fue fundamental para el crecimiento del PIB durante el 2023.* Gobierno de Colombia.

N, D. F., L, D. R., & M, F. T. (2012). Comercialización de papa de las variedades Diacol capiro, parda pastusa *Solanum tuberosum* L. y amarilla *Solanum phureja*, en tres corregimientos del municipio de Pasto. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 29(1), 16–28.

<https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/365>

Novoa Julio. (2020). *Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental*, 1–158.

Ñústez, C., Carlos Barrientos, J., & EDUARDO ÑÚSTÉZ, C. (2014). Difusión de seis nuevas variedades de papa en Boyacá y Cundinamarca (Colombia) entre 2003 y 2010. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 8(1), 126–141.

<https://doi.org/10.17584/RCCH.2014V8I1.2806>

Ñústez López, C. E., Marcela, ;, Castellanos, S., & Abril, M. S. (2009). ACUMULACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE MATERIA SECA DE CUATRO VARIEDADES DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN ZIPAQUIRÁ, CUNDINAMARCA (COLOMBIA). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62(1), 4823–4834.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472009000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Ojha, S., Karki, L. B., & Ali, M. (2025). A Comprehensive Analysis of Potato Production and Trade: Global Trends and U.S. Production Forecasting. *American Journal of Economics and Business Innovation*, 4(2), 42–48. <https://doi.org/10.54536/AJEI.V4I2.4311>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Agencia de Desarrollo Rural. (n.d.). Retrieved June 19, 2025, from www.digitosydiseños.com.co

Ortega Arango, M. A. (2018). *Infraestructura vial y producción agrícola de los hogares rurales colombianos*. Uniandes. <https://hdl.handle.net/1992/34746>

Pachón, E. M., Cordoba, S. del C. I., Cardona, C. A. B., Gil, L. F. G., Mejía, P. U., Paguay, C. A. M., Muñoz, D. A. C., España, D. F. M., Escobar, D. T., Chico, H. C. A., Zambrano, H. S. R., Peñafiel, H. V. L., Vásquez, L. L., Mancilla, L. T. L., Manrique, L. F. R., Flórez, L. F. V., Cabrera, M. K. P., & Erazo, S. N. Y. (2021). Caracterización del sistema productivo de papa en el departamento de Nariño 2015-2020. *Editorial AGROSAVIA*. <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.ANALISIS.7404814>

Página no encontrada – CCI Corporación Colombia Internacional. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://www.cci.org.co/pagina-no-encontrada/>

Página Principal Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://www.minagricultura.gov.co/paginas/default.aspx>

Palacio Germán. (2023). *FEDERACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE PAPA-FEDEPAPA*. <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2024/07/INFORME-DE-GESTION-VIGENCIA-2023.pdf>

(PDF) 7. *Caracterización y diseño de alternativas de mejora en centros de acopio primarios*. (n.d.).

Retrieved May 20, 2025, from

https://www.researchgate.net/publication/338045662_7_Caracterizacion_y_diseno_de_alternativas_de_mejora_en centros_de_acopio_primarios

Peréz Andrés. (n.d.). *EL PAPI CULTOR CUNDIBOYACENSE Y LA NUEVA ERA DE LA TECNOLOGÍA. ¡QUÉ BUENA PAPA! ANDRÉS PEREZ DAYANA LUGO TATIANA TURRIAGO*.

Plan de Ordenamiento Productivo para la Cadena de la Papa en Colombia. (n.d.).

Política editorial, ética de publicación y declaración de mala conducta. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/index/ethics>

Por, P., Antonio, O., & Arbelaez, A. (2021). *Seguimiento y fortalecimiento de las mesas técnica agroclimática de Nariño, Colombia*. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security. <https://hdl.handle.net/10568/116807>

Portal INVÍAS - Colombia. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://www.invias.gov.co/>

Power, D. J. (2002). *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers Managers*. <https://scholarworks.uni.edu/facbook/67>

Proyectos integrales – Agencia de Desarrollo Rural. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://www.adr.gov.co/atencion-y-servicios-a-la-ciudadania/proyectos-integrales-2/>

- Pulido Maria. (2006, May 28). *Análisis de riesgo financiero para el sector de la papa en Boyacá*.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/25d27843-6dbb-421d-a259-e759ab70f499/content>
- Ramírez-Gómez, C. J., & Sánchez-Gómez, J. (2025). El enfoque de redes de colaboración para el análisis del Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria en Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 15(1), 87–100.
<https://doi.org/10.19053/UPTC.20278306.V15.N1.2025.18824>
- Raza, S. M., Sajid, M., & Singh, J. (2022). Vehicle Routing Problem Using Reinforcement Learning: Recent Advancements. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 858, 269–280.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-0840-8_20
- Roa, E. C. (1992). PROYECTO INTEGRAL DE DESARROLLO DE MERCADEO AGROPECUARIO EN BOYACA ALGUNAS REFLEXIONES METODOLOGICAS. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 29.
<https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/desarrolloRural/article/view/3347>
- Rob J Hyndman and George Athanasopoulos. (n.d.). *Forecasting: Principles and Practice (3rd ed)*. Retrieved May 20, 2025, from <https://otexts.com/fpp3/>
- Rodríguez Alexander. (2023, February 24). *Plan de Ordenamiento Productivo para la Cadena de la Papa en Colombia*. https://www.upra.gov.co/es-co/POP_Documentos/POP_Cadena_Papa.pdf
- Romero-Sanchez, D., Barrientos Fuentes, J. C., & Barrios, D. (2024). Factores asociados al uso de la banca digital en pequeños agronegocios de la región central de Colombia. *Innovar*, 34(94), e116820. <https://doi.org/10.15446/innovar.v34n94.116820>

Rose, D. C., Wheeler, R., Winter, M., Lobley, M., & Chivers, C. A. (2021). Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*, *100*, 104933.

<https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2020.104933>

Sala de Prensa La reconversión productiva de la papa colombiana: ¡acciones para mejorar la producción agropecuaria! (n.d.). Retrieved June 19, 2025, from https://upra.gov.co/es-co/saladeprensa/Paginas/La-reconversi%C3%B3n-productiva-de-la-papa-colombiana-%C2%A1acciones-para-mejorar-la-producci%C3%B3n-agropecuaria%21.aspx?utm_source=chatgpt.com

Sánchez, A. S. (1990). *CAMPUS MONTECILLO PÓSTGRADO DE SOCIECONOMÍA ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA ECONOMÍA FACTORES QUE DETERMINAN LA DEMANDA DE PAPA PROCESADA EN MÉXICO.*

Sebastián, J., & Grisales, M. (2018). *Localización de plataformas logísticas rurales y diseño de un sistema de ruteo para la consolidación de la carga de pequeños y medianos productores del sector frutícola en el departamento de Boyacá.* <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68667>

Stadtler, H., & Kilger, C. (2008). Supply chain management and advanced planning (Fourth edition): Concepts, models, software, and case studies. *Supply Chain Management and Advanced Planning (Fourth Edition): Concepts, Models, Software, and Case Studies*, 1–556. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74512-9>

Suarez-Chilma, V. F., Sarache, W. A., Costa, Y. J., Suarez-Chilma, V. F., Sarache, W. A., & Costa, Y. J. (2018). Una Solución al Enrutamiento de Vehículos en Ciudades Montañosas Considerando Aspectos Ambientales y Económicos. *Información Tecnológica*, *29*(3), 3–14.

<https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300003>

Transparencia y acceso a la Información Pública | Sede Electronica. (n.d.). Retrieved May 20, 2025, from <https://sedeelectronica.sic.gov.co/transparencia>

Trapero, J. R., Cardós, M., & Kourentzes, N. (2019). Quantile forecast optimal combination to enhance safety stock estimation. *International Journal of Forecasting*, 35(1), 239–250. <https://doi.org/10.1016/J.IJFORECAST.2018.05.009>

Tsolakis, N., Anastasiadis, F., & Srai, J. S. (2018). Sustainability Performance in Food Supply Networks: Insights from the UK Industry. *Sustainability 2018, Vol. 10, Page 3148, 10(9)*, 3148. <https://doi.org/10.3390/SU10093148>

Tsolakis, N., De Silva, D., & Kumar, C. (2018). Supply chain forecasting in perishable food systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 146, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.001>

Unidas, N. (2019). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2019-2020*. www.fao.org/americas

Valentina, P., & Rojas, G. (n.d.). *Sistema de pronóstico de demanda y programación de producción eficiente para optimizar la cadena de suministro en la empresa Los Ahumadores de Chaquiro SAS*.

Van Der Vorst, J. G. A. J., Tromp, S. O., & Van Der Zee, D. J. (2009). Simulation modelling for food supply chain redesign; Integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, 47(23), 6611–6631. <https://doi.org/10.1080/00207540802356747;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>

- Velez Felipe. (2020). *CADENAS SOSTENIBLES ANTE UN CLIMA CAMBIANTE LA PAPA EN COLOMBIA*. https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_CIAT_PapaPag_sencillas_web.pdf
- Vianchá Sánchez, Z. H. (2014). Models and configurations of supply chains in perishable goods. *Ingeniería y Desarrollo*, 32(1), 138–154. <https://doi.org/10.14482/INDE.32.1.4577>
- Vivanco Hidalgo, I. M., Sisalema Morejón, L. A., Rosillo Toro, W. V., Villavicencio Morejón, B. X., Vivanco Hidalgo, I. M., Sisalema Morejón, L. A., Rosillo Toro, W. V., & Villavicencio Morejón, B. X. (2023). Creación de un centro de acopio de productos agrícolas con base en la economía popular y solidaria. *Cofin Habana*, 17(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612023000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Wen, D., He, M., Zhang, Y., & Wang, Y. (2022). Forecasting realized volatility of Chinese stock market: A simple but efficient truncated approach. *Journal of Forecasting*, 41(2), 230–251. <https://doi.org/10.1002/FOR.2807>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2017.01.023>
- Wu, S., Goodwin, B. K., & Coble, K. (2020). Moral hazard and subsidized crop insurance. *Agricultural Economics*, 51(1), 131–142. <https://doi.org/10.1111/AGEC.12545>
- Yan-E, D. (2011). Design of intelligent agriculture management information system based on IoT. *Proceedings - 4th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2011*, 1, 1045–1049. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2011.262>

Yost, R., Attanandana, T., Colfer, C. J. P., Itoga, S., Yost, R., Attanandana, T., Colfer, C. J. P., &

Itoga, S. (2011). Decision Support Systems in Agriculture: Some Successes and a Bright Future.

Efficient Decision Support Systems - Practice and Challenges From Current to Future.

<https://doi.org/10.5772/16380>