

**Diseño e Implementación de un Derivado Climático como Instrumento de Cobertura
Financiera para la Producción de Papa en Colombia**

Natalia Pabón y Juan José Rodríguez

Maestría en Finanzas Corporativas

Colegio de Estudios Superiores en Administración - CESA

Bogotá D.C., Colombia

2024

**Diseño e Implementación de un Derivado Climático como Instrumento de Cobertura
Financiera para la Producción de Papa en Colombia**

Natalia Pabón y Juan José Rodríguez

Director

Bernardo León

Maestría en Finanzas Corporativas

Colegio de Estudios Superiores en Administración - CESA

Bogotá D.C., Colombia

2024

2

Tabla de contenido

Planteamiento del Problema	4
Cultivo de Papa en Colombia.....	5
Efectos del Clima en el Cultivo de Papa.....	7
Cobertura ante el Riesgo Climático	10
Hipótesis.....	11
Objetivo General.....	11
Objetivos Específicos.....	11
Revisión de la Literatura.....	12
Instrumentos de Cobertura ante Riesgos Climáticos	13
Aplicación de los Derivados Climáticos.....	14
Aspectos sociales, económicos y legales	17
Marco Teórico	18
Contratos Incompletos	19
Derivados Climáticos.....	21
Metodología	24
Condiciones Climáticas para el Cultivo de Papa en Colombia.....	25
Datos climáticos y distribución del subyacente	26
Propuesta de derivado climático	31
Conclusiones	33
Listado de referencias.....	35
Anexo.....	39
Índice de ilustraciones	40
Índice de tablas.....	40
Índice de ecuaciones.....	41

Planteamiento del Problema

El continuo uso de recursos naturales en las actividades económicas implica que para las empresas sea de gran importancia contar con la capacidad para predecir y adaptarse a variaciones en el clima con el fin de mitigar los riesgos financieros que tengan relación con su ejercicio. Domínguez y Velásquez (2020, p. 49) realizaron un estudio sobre el impacto del riesgo climático en las actividades económicas y encontraron que la mayoría de los sectores productivos son vulnerables al clima debido a la alta interrelación que tienen entre sí, pero los patrones climáticos y los cambios en las temperaturas hacen que se enfrente una mayor incertidumbre en el sector primario de la economía por la inestabilidad propia de los procesos naturales. Es decir que las empresas pertenecientes a dicho sector, y particularmente las relacionadas al sector agrícola, tienen una mayor tendencia a sufrir riesgos climáticos, por lo cual es primordial generar mecanismos de mitigación y adaptación para ellas.

Los efectos de las variaciones climáticas sobre las actividades económicas y productivas a nivel mundial repercuten en la capacidad de incrementar los ingresos y ganancias por parte de diversos sectores productivos, en un estudio enfocado en valorar las opciones climáticas para la producción de café en México los autores relacionaron los ingresos en la agricultura con fluctuaciones meteorológicas como la temperatura, lluvia, humedad y luz solar susceptibles de aumentar con el cambio climático (Allou-Alfonse et al., 2018, pp. 136-137). En este sentido, dichos autores diferencian la variabilidad climática, que hace referencia a diferencias típicas del clima en una ubicación temporal y espacial puntual, del cambio climático, entendido como la modificación de las variables climáticas en el largo plazo.

La importancia que tienen las actividades agrícolas en la economía colombiana la hacen particularmente susceptible a las fluctuaciones crecientes en las variables asociadas al cambio

climático y al riesgo financiero que esto conlleva. A continuación, se examinará el caso del cultivo de papa en Colombia.

Cultivo de Papa en Colombia

La papa es un tubérculo de alto valor nutritivo, fuente importante de almidón, carbohidrato, potasio, vitamina B6 y de gran consumo en Colombia, representa cerca del 32% de los cultivos en fase transitoria en el país contribuyendo a incrementar ingresos para los productores agrícolas.

El consumo de papa en Colombia ha disminuido ya que la población ha venido adquiriendo nuevos hábitos alimenticios y ha aumentado la cantidad de productos suplementarios, el promedio anual de consumo pasó de 75 a 62 kilos por persona entre el 2000 y el 2009 (SIC, 2010), sin embargo, la papa aún ocupa un lugar crítico en la canasta familiar colombiana, por lo cual es fundamental el seguimiento detallado de las fluctuaciones en su producción y precio.

Para los años 2000 y 2009, la SIC (2010) encontró una tendencia a la baja en la cantidad de hectáreas cosechadas, mientras la producción de papa en toneladas mantuvo una tendencia al alza con variaciones importantes de año a año en ambas variables debido a distintos fenómenos climáticos, sanitarios, económicos y comerciales. En el Gráfico 1 se ilustra el mismo ejercicio para los años 2010 y 2022, en este periodo también se encuentran fuertes variaciones anuales y, mientras el área cosechada no creció al término del periodo, hubo un incremento del 12% en la producción total. Una fuerte caída en 2018 se explica principalmente por los bajos precios debidos a una fuerte competencia de papa congelada importada y los rezagos del fenómeno de *El Niño* del año inmediatamente anterior.

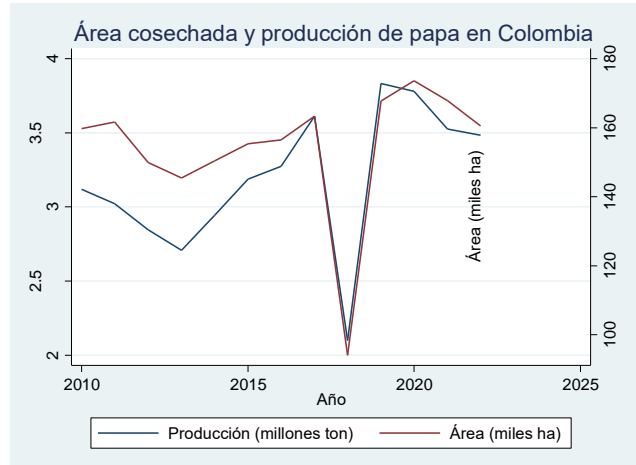


Ilustración 1. Área cosechada en miles de hectáreas y producción en millones de toneladas de papa en Colombia entre los años 2010 y 2022 (Elaboración propia con datos de <https://www.agronet.gov.co>).

Según la SIC (2010), en Colombia hay cerca de 90.000 productores de papa, los cuales se clasifican en pequeños, medianos y grandes de acuerdo con la cantidad de hectáreas cultivadas. Los pequeños, tienen una producción de papa en menos de 3 hectáreas y son el 85% de los productores, seguidos por los medianos quienes tienen una producción entre 3 a 10 hectáreas y son el 10% de los productores, y finalmente, se encuentran los grandes produciendo en más de 10 hectáreas y son el 5% restante.

Los principales costos para los productores de papa son los fertilizantes, insecticidas, fungicidas y herbicidas, que en conjunto representan el 40% de los costos asumidos por los productores para mantener la productividad, sin embargo, su composición varía entre regiones y tipos de productores. La zona que tiene mayor participación en la compra de fertilizantes edáficos es Cauca-Nariño, seguida por Antioquia y la zona Cundiboyacense. La participación en la compra de los insecticidas, al igual que con los fungicidas, la encabeza la zona Cundiboyacense, seguida por Antioquia y la zona de Cauca-Nariño. Finalmente, la participación en la compra de los

herbicidas la encabeza Antioquia, pero las zonas Cauca-Nariño y Cundiboyacense están muy atrás (SIC, 2010).

La producción de papa se ha expandido aceleradamente en los países de Sur América, donde Brasil y Uruguay encabezan el listado de un mercado que produce aproximadamente 120 millones de dólares al año. Las compras regionales de papa procesada se elevan a un 60% con respecto al total, el 40% que resta es de papa cruda o refrigerada la cual se usa para consumo directo o como semilla. Finalmente, la exportación de la papa y sus derivados hacia Chile también ha tenido un incremento en los últimos años (Muchnik & Tejo, 1997).

Efectos del Clima en el Cultivo de Papa

La riqueza agrícola de Colombia radica en su clima tropical y su rango de elevaciones que permiten a la sociedad una gran variedad de cultivos para la siembra y facilitan la agricultura. Dado que en Colombia no hay estaciones marcadas que condicionen los cultivos y la siembra, existe una alta diversidad de productos agropecuarios presentes en la mayor parte del año. Por otro lado, los pisos térmicos exponen los cultivos a diversas condiciones climáticas y por ende la producción se adecúa a ellos. Según Montes (2021), los suelos de siembra tienen una clasificación dada su elevación, los suelos cálidos están a una altitud inferior a 1.000 m.s.n.m. y presentan temperaturas que superan los 24°C, los suelos templados están a una altitud entre 1.000 m.s.n.m. y 2.000 m.s.n.m. y presentan temperaturas oscilantes entre 24°C y 18°C, finalmente, los suelos fríos están a una altitud superior a 2.000 m.s.n.m. y presentan temperaturas menores a 18°C.

La altitud y la temperatura influyen en el desarrollo, el crecimiento, la productividad y la terminación de los ciclos de cultivo de las distintas variedades de papa. En cuanto al desarrollo del

tubérculo, una mayor altitud incrementa el tiempo y los ciclos de cultivo, sin embargo, los suelos fríos y templados facilitan su crecimiento y aumentan su productividad. En cambio, los suelos cálidos llevan a un mayor crecimiento de las hojas y menor generación de biomasa.

La altitud idónea para el cultivo de papa es desde 1.500 m.s.n.m. hasta 2.500 m.s.n.m., pero los tubérculos pueden desarrollarse en alturas desde 460 m.s.n.m. hasta 3000 m.s.n.m. La temperatura es el factor limitante, si esta es inferior a 10°C y superior a 30°C los cultivos sufren una afectación inmediata y directa. La temperatura ideal para la producción de papa es entre 17°C y 23°C (Rubio et al., 2000).

La producción de papa se inicia a principios de la temporada de lluvias en zonas templadas, seguido por las regiones más calurosas. La papa se considera un tubérculo con tendencia termo periódica, por lo cual requiere temperaturas diferenciadas entre el día y la noche con una oscilación ideal de 10°C a 25°C en el aire. Una adecuada temperatura del suelo se sitúa entre 10°C y 16°C durante la noche y entre 16°C y 22°C en el día, una variación mayor en la temperatura indicada afecta el crecimiento y tuberización de la papa (Rubio et al., 2000). En las tablas 1 y 2 se presentan las temperaturas requeridas en el aire y en el suelo para cada etapa del cultivo:

Etapa	Temperatura
Dos semanas después de la siembra	13°C
Desarrollo Foliar	12°C a 14°C
Elongación de tallo y floración	18°C
Formación de tubérculos	16°C a 20°C

Tabla 1. Requisitos de temperatura en el ambiente para el cultivo de papa por etapa de desarrollo (INTAGRI., 2017).

Etapas	Temperatura
Emergencia y crecimiento	21°C a 24°C
Formación de tubérculos	15°C a 24°C

Tabla 2. Requisitos de temperatura en el suelo para el cultivo de papa por etapas de desarrollo. (INTAGRI., 2017).

Una temperatura del suelo inferior debilita el crecimiento y desarrollo de las raíces, también afecta la absorción de nutrientes como el fósforo. Adicionalmente, las temperaturas medias y elevadas aceleran el desarrollo de la planta, pero así mismo su envejecimiento.

El crecimiento de la papa se puede dar en la gran mayoría de suelos, sin embargo, es preferible el uso de suelos con poca resistencia al crecimiento de tubérculos como los francos, franco-arenosos, franco-limosos y franco-arcillosos, los cuales tienen un drenaje óptimo, una ventilación adecuada, y además facilitan la cosecha. Los suelos que tienen texturas arcillosas tienden a ser idóneos para fomentar el crecimiento de estolones y la producción de tubérculos de la papa aplicando materia orgánica y regulando las frecuencias de riego (Rubio et al., 2000).

El requerimiento hídrico para los cultivos de papa varía de los 600 a los 1.000 milímetros de agua por ciclo de producción, y dependen de la temperatura, la variedad del suelo y su capacidad de almacenamiento. Existen elevados requerimientos hídricos iniciando en las etapas de germinación y crecimiento de los tubérculos.

Los cultivos de papa requieren una fuente continua de luz, la cual afecta los procesos de la fotosíntesis de la planta y una serie de reacciones secundarias en las cuales interviene el agua y el dióxido de carbono. La cantidad de luz que deben recibir los cultivos varía dependiendo de la temperatura, óptimamente requiere periodos de aproximadamente 8 a 12 horas, pero puede llegar

a requerir hasta 16 horas de luminosidad. En los días cortos, los ciclos vegetativos tienen una menor duración y se favorece el inicio de la tuberización, y en los días largos hay un efecto contrario (Rubio et al., 2000).

Cobertura ante el Riesgo Climático

El problema central en sí no es la vulnerabilidad recién explicada de los cultivos de papa frente a los factores climáticos, sino la falta de herramientas al alcance de los productores para minimizar los riesgos y maximizar sus rendimientos. La incidencia que tienen los factores del clima y, particularmente, la generada por los fenómenos de *El Niño* y *La Niña* tiene grandes implicaciones para la economía colombiana ya que la agricultura es una de sus principales actividades económicas y los productores agrícolas hasta ahora no cuentan con gran capacidad para adaptarse a fluctuaciones climáticas y para enfrentar las consecuencias de sus riesgos asociados de forma eficaz (Vargas Arayón & Ríos Castro, 2017, p. 57). El clima tiene una importancia innegable para los agricultores ya que da valor a sus actividades productivas, esto hace innegociable la gestión sobre los riesgos que este genera.

Las coberturas de seguros típicas cubren eventos de pérdida total por catástrofes u otro tipo de eventos de baja probabilidad de ocurrencia, sin embargo, no suelen cubrir eventos de mayor frecuencia que pueden afectar las ganancias de los productores. Es decir, los seguros típicos cubren eventos de alto riesgo y baja frecuencia, en cambio los derivados climáticos se concentran en eventos con riesgo mucho más bajo, pero con mayor frecuencia (López, Carreño & Uribe, 2013).

Como ya se explicó, cualquier sector económico puede verse afectado, ya sea de manera positiva o negativa, por el comportamiento de las variables meteorológicas. Los vientos, las

lluvias, los cambios de temperatura, la nieve, la escarcha e incluso las tormentas tropicales tienen impactos en las actividades económicas que pueden afectar la generación de valor económico.

Se hace necesario entonces desarrollar herramientas y ponerlas a disposición de los productores para que puedan incrementar su capacidad adaptativa en las condiciones particulares de Colombia, en este sentido, se plantea la pregunta: ¿cómo se pueden mitigar los riesgos financieros relacionados con los cambios climáticos en el cultivo de papa en Colombia?

Hipótesis

Los derivados climáticos basados en la temperatura son una herramienta de cubrimiento financiero idónea para mitigar los riesgos climáticos de los productores de papa en Colombia.

Objetivo General

Plantear un producto de cobertura financiera útil para mitigar los riesgos financieros asociados al clima en el cultivo de la papa en Colombia.

Objetivos Específicos

- Describir las condiciones climáticas para el cultivo de papa en Colombia y estimar el efecto de distintas variables sobre su producción.
- Identificar los impactos sociales y económicos que pueden tener los instrumentos para la cobertura de riesgos climáticos sobre los productores de papa en Colombia.

- Evaluar la distribución de las variables climáticas subyacentes y aproximar una función de distribución para el pago de los derechos generados.
- Proponer un producto de tipo derivado climático para la cobertura de riesgos climáticos en el cultivo de papa en Colombia y aproximar su valoración.
- Demostrar mediante un ejemplo, cómo se realizará el diseño e implementación del derivado climático, estimando su prima y su pago.

Revisión de la Literatura

Eventos climáticos de alta probabilidad tales como el incremento en las lluvias y las fluctuaciones atípicas en la temperatura pueden impactar frecuentemente la productividad de las empresas y, en últimas, la volatilidad de los precios a los consumidores. En este contexto los derivados climáticos, definidos como instrumentos financieros que dependen de variables climáticas subyacentes, pueden servir como cobertura frente a eventos inesperados del clima, aún en mercados incompletos, dado que se logra transferir el riesgo al mercado financiero de forma efectiva (Cruz & Llinás, 2010, p. 123).

Estos contratos de aseguramiento pueden ser una herramienta de cubrimiento financiero para sectores fácilmente impactados por eventos climáticos de alta frecuencia, como lo es el cultivo de papa en Colombia, y existen porque la reacción de los mercados financieros frente a los riesgos climáticos es limitada por problemas de información asimétrica y mercados incompletos lo cual lleva a un manejo ineficiente del riesgo.

Recientemente, un artículo encontró que aun cuando las sequías impactan directamente los rendimientos de los productores agrícolas, las acciones en bolsa de compañías agrícolas tienden a

reaccionar subestimando esta información, lo cual se puede deber a limitaciones propias de los inversionistas institucionales locales, pero también a la misma desatención y miopía de los agentes financieros frente a dicha relación (Hong, Li & Xu, 2019). Esto demuestra que los canales financieros tradicionales son insuficientes para gestionar los riesgos climáticos y que una aproximación provechosa puede ser el uso de instrumentos que hagan evidente la fuente de dichos riesgos y moneticen sus efectos.

Instrumentos de Cobertura ante Riesgos Climáticos

El clima, como otros factores de riesgo, no puede ser eliminado mientras se mantenga la actividad económica, pero sí puede ser gestionado. La cobertura del riesgo climático genera beneficios para los productores y puede llevarse a cabo por medio de distintos instrumentos que el mercado asegurador ha desarrollado, como los seguros convencionales de producción agrícola o de lucro cesante, sin embargo, estos enfrentan dificultades y costos adicionales en la estimación de los daños a indemnizar.

Los seguros paramétricos son un tipo de producto financiero que facilita la gestión de estos riesgos pues el pago que se genera no depende de las pérdidas ocasionadas por determinado evento, sino del cumplimiento o no de índices previamente establecidos y objetivamente medibles (FASECOLDA, 2022). Si bien un producto de este tipo está estructurado como un derivado climático pues busca compensar la ocurrencia de un determinado evento y no necesariamente indemnizar una pérdida real, Segura Riveira (2022) concluye que es apropiada su calificación como seguro mientras exista un interés asegurable con el que guarden relación el evento y la compensación.

La principal ventaja de los derivados financieros con subyacentes climáticos sobre dichos productos es que su estructura de pagos depende de un evento climático, específico y exógeno, relacionado con los rendimientos de los cultivos, pero no implica realizar directamente este cálculo económico para determinar cada pago junto con el riesgo moral que esto implica (Turvey, 2001, pp. 333-335). De esta forma se han sofisticado los portafolios ofertados por los aseguradores permitiendo el uso de productos diseñados específicamente para mitigar riesgos climáticos, y que por lo tanto son más convenientes y efectivos.

Aplicación de los Derivados Climáticos

Para entender si un derivado climático es útil en un caso particular primero se debe determinar la sensibilidad específica de la producción agrícola que se busca proteger con respecto a factores externos del clima, como la lluvia o el calor, asumiendo que se mantienen constantes los factores de producción. Para determinar esto, Cruz y Llinás desarrollan una metodología que consiste en estimar la significancia estadística de una ecuación de producción tipo Cobb-Douglas linealizada con datos históricos donde se mida el cambio en la producción agrícola como resultado de los milímetros de lluvia diaria acumulada sobre el promedio y los grados de temperatura en exceso sobre el promedio (2010, pp. 131-136). Más aún, el desarrollo de esta metodología permite monetizar el efecto estimado y es un punto de partida para la posterior estructuración y valuación del producto.

Se han apreciado acercamientos en la aplicación del modelo matemático anteriormente descrito, utilizando las fluctuaciones de la temperatura, los vientos y las lluvias, entre otros, como opciones de cobertura ante eventos climáticos. Esto se evidencia en un trabajo desarrollado en

México sobre derivados climáticos para el sector pesquero el cual propone un derivado sobre la temperatura del mar que proporcionará cobertura ante caídas en la producción pesquera como consecuencia de los efectos ocasionados por el fenómeno de *El Niño*; sin embargo, ya que la temperatura no es un índice negociable en México se considera el precio como un riesgo de mercado para su evaluación (Alva-Vásquez y Sierra-Juárez, 2011). De esta manera, se evidencia que el desarrollo de derivados climáticos en economías por pequeñas que parezca puede generar cubrimiento en riesgos asociados con el clima que permiten protegerlo bajo eventos de alta probabilidad.

Continuando con las aplicaciones que se han hecho en México, se encuentra que se ha hecho la valoración de opciones sobre índices de temperatura. Climent y Rodríguez (2020) proponen valorar opciones sobre índices de temperatura que se basen en la aplicación de una ecuación diferencial de tipo estocástico, esto mediante el análisis del comportamiento de la temperatura del observatorio de Tacubaya en el periodo de 01/01/1958 al 31/12/2018. Este estudio busca cuantificar la cobertura para cualquier empresa que la requiera y como resultado minimizan los costos por consumo energético. Con esta aplicación logramos evidenciar que los usos de los derivados son aplicables en grandes empresas que, aunque también cuentan con seguros que cubren eventos de baja probabilidad, tienen la necesidad de cubrirse ante eventos regulares.

Por último, se evidencia una aplicación en un estudio realizado en el sector agrícola sobre la producción de café en México. Allou-Alfonse et al. (2018) proponen que el sector agrícola es uno de los más afectados por el cambio climático, siendo además fuente de recursos primordial para las poblaciones más vulnerables. Mientras, en un estudio sobre los cultivos de café Houghton et al. (2001) mencionan que el aumento en la variación de las condiciones climáticas y que fenómenos medioambientales tales como *El Niño* incrementan la frecuencia de aparición de climas

más extremos, lo cual provoca mayores fluctuaciones y pérdidas en volumen y calidad de las cosechas de café. Es aquí donde se introducen los derivados climáticos como herramientas de transferencia de riesgo, los cuales combinan en una proporción ideal el riesgo del clima con la rentabilidad esperada.

En un estudio de Pulido Arenas (2006) se muestra que el negocio de la agricultura y, en específico, el cultivo de la papa es altamente volátil ya que además de la demanda y oferta del producto, variaciones en la temperatura, lluvias y sequías también afectan el precio de la papa determinadamente. Por esto es primordial que se realice una estrategia de manejo del riesgo de precio que le permita a la industria y a los productores manejar la volatilidad del mercado, y se identifican los derivados climáticos como una opción que ofrece también cobertura ante el riesgo de precio al cual se enfrentan.

A partir de los precios de la papa *Diacol Capiro*, Lizarazo Rengifo (2016) ha desarrollado dos modelos de predicción, que toman como línea de base un modelo SARIMA y una Red Neuronal Artificial (RNA), para analizar los riesgos asumidos por el sector papero y las consecuencias del cambio climático sobre la agricultura. Esta aproximación metodológica le permite diseñar una propuesta para el cubrimiento de las altas volatilidades en los precios, especialmente de la papa, mediante la estructuración de instrumentos de cobertura basados en derivados financieros.

En Colombia, por tanto, la papa es un producto tan importante que existe la necesidad de cubrirse ante la variación de sus precios, por lo cual es relevante intentar modelar la complejidad de los precios de mercado por medio de información histórica y crear instrumentos financieros que garanticen que el pequeño, mediano y gran productor puedan tener utilidades por sus cosechas e, inclusive, que estas tengan algún grado de predictibilidad.

Aspectos sociales, económicos y legales

Un riesgo emergente como lo es el climático, a diferencia de otros tipos de riesgos como de mercado, comercial o financiero, no es tan fácilmente prevenido, mitigado o transferido y en muchos casos debe ser aceptado para continuar en la actividad agropecuaria, sin embargo, se han venido desarrollado las herramientas que se discutieron anteriormente para permitirle al productor cubrir estos riesgos por eventos con alta probabilidad.

La exposición de los productores a sufrir importantes pérdidas económicas ante cambios de una o más variables meteorológicas da paso a los derivados climáticos como herramientas económicas y sociales útiles para la comunidad agricultora, ya que le permiten transferir el riesgo al mercado financiero y cubrirse de manera efectiva frente a condiciones cambiantes. Además, la implementación de estas herramientas podría otorgar ventajas reputacionales a los productores involucrados para acceder a capital, crédito y acuerdos comerciales por su gestión activa del riesgo.

En busca de mecanismos de cobertura, la legislación colombiana estableció el seguro agropecuario mediante la Ley 69 de 1993 para incentivar y proteger la producción agropecuaria, y posteriormente, se incluyó un incentivo a este aseguramiento mediante el subsidio de la prima según las condiciones establecidas en el decreto 2555 del Ministerio de Hacienda y Crédito Público del 2010, es decir, entendido como un seguro catastrófico tradicional asociado a los costos de producción del agricultor, sin embargo, en la Ley 1955 de 2019 (Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022), en el decreto 211 de 2020 y en la Ley 2178 de 2021 se estableció expresamente que el seguro agropecuario podría ofrecerse bajo la modalidad de seguro paramétrico lo que permite aprovechar la facilidad y menores costos de estos contratos estandarizados.

Aun recientemente, se modificó el Estatuto Orgánico del Sistema Financiero y el Código de Comercio en Colombia por medio de los artículos 241, 242 y 243 de la ley 2294 de 2023 (Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026) para incorporar una definición general de los seguros paramétricos y su autorización más allá del sector agropecuario, así como para determinar que la ocurrencia del siniestro y su cuantía se pueda demostrar mediante el índice y modelo definidos en el contrato de aseguramiento demostrando así el interés continuo del legislador y los reguladores de sacar provecho de estas herramientas para aumentar el acceso a coberturas financieras de riesgo.

En este mismo sentido, PNUD (2023) con apoyo de la Unidad de Proyección Normativa y Estudios de Regulación Financiera estudió las experiencias y normativas nacionales e internacionales de los seguros paramétricos, tras lo cual recomendó una legislación específica a los seguros paramétricos enfocada en plantearlos de forma complementaria a los seguros tradicionales con principio indemnizatorio y definir claramente la exposición al riesgo y la existencia del interés asegurable para evitar su uso especulativo como derivados climáticos, pero de forma lo suficientemente amplia para no limitar su aplicación en distintos campos económicos.

Por otro lado, se encuentran los agricultores y dueños de cosechas con disposición de aprendizaje y voluntad para gestionar sus riesgos de una manera asertiva y así reducir su exposición a pérdidas inesperadas.

Marco Teórico

Cuando dos firmas buscan entrar en una relación de compraventa, pero se enfrentan a un futuro incierto, les es imposible llegar a un acuerdo que considere todas las posibles contingencias,

ya sea por los costos de transacción que esto implica o porque el universo de posibilidades es inabarcable, a esto se le llama teoría de contratos incompletos¹.

Contratos Incompletos

Las firmas en una relación de este tipo enfrentan un problema de inversión insuficiente dada la incertidumbre a la que se enfrentan en el futuro. Un contrato de largo plazo (de más de un periodo) puede solucionar este problema sin necesidad de considerar expresamente cada posible contingencia, este contrato debe comprometer a las partes a realizar una transacción dado el cumplimiento de ciertas condiciones o, de lo contrario, imponer un pago en cualquier sentido (un pago por disponibilidad o una sanción por incumplimiento). De esta forma es posible distribuir entre las firmas el retorno o el costo intertemporal asociado a la transacción y así optimizar la inversión requerida (Hart, 1995), sin embargo, cuando es posible renegociar el contrato no se soluciona el problema pues en el momento en el que hay más información disponible las partes tienen incentivos para buscar cambiar las condiciones o incumplir su parte si no les resulta tan beneficioso, por lo tanto, este tipo de contratación da la opción a las firmas de incurrir en transacciones rentables bajo ciertas condiciones, pero no las puede obligar.

Ya que en estas relaciones de compraventa intertemporales hay costos hundidos en los que cada firma debe incurrir y que contribuyen al retorno a repartir entre las firmas cuando se complete la transacción, se pueden reducir a un problema de riesgo moral donde cada contraparte puede comportarse de forma oportunista socavando el beneficio total de la transacción. Según Aghion et

¹ Esto implica también que los derechos de propiedad son incompletos pues de todo acuerdo sobre el manejo de activos se desprenden necesariamente derechos de control residuales sobre estos y, más aún, de esta forma se puede explicar el financiamiento con deuda en la estructura de capital de las empresas cuando las partes tienen una riqueza limitada (Fama, 1990).

al (1994), incluir mecanismos de monitoreo para la renegociación del contrato inicial como condiciones por defecto en caso de desacuerdo (niveles de transacción estándar o sanciones por demoras) o la transferencia de todo el poder de negociación a una de las partes (cláusulas de cumplimiento específicas o depósitos de seguridad), permiten una mejor distribución del riesgo y niveles de inversión óptimos. La diferencia clave frente a lo propuesto por Hart es que acá las partes tienen opciones distintas a la no realización de la transacción en caso de inconformidad, en particular, una de las partes se enfrenta a sanciones ineficientes y sólo podrá participar del retorno total en la medida en la que el nivel de transacción predeterminado corresponda al nivel óptimo para ella.

Finalmente, al considerar asimetrías en la información disponible para las firmas en negociación, Tirole (1986) encuentra que las cláusulas sancionatorias pueden ser contraproducentes cuando los niveles de inversión (o los retornos asociados) son observables, pero no verificables. En cambio, propone mecanismos alternativos como un precio fijado previamente o la transmisión de todos los costos incurridos en exceso a una de las partes, como lo son los seguros paramétricos o los derivados financieros los cuales se explicarán en mayor detalle.

Los derivados son instrumentos financieros cuyo valor obedece al del activo subyacente determinado en el contrato (Hull, 2018). En los derivados climáticos las variables establecidas no tienen un valor monetario intrínseco, sino que deben ser valoradas acorde a su relación con el riesgo financiero generado dependiendo de cuál sea el objetivo de cobertura.

De esta forma, se ha estructurado un tipo de producto financiero llamado derivado climático enfocado únicamente a lidiar con los riesgos financieros asociados a eventos climáticos de alta frecuencia. Estos son contratos por medio de los cuales las empresas pueden, por ejemplo, adquirir una opción *put* que las indemniza monetariamente si la lluvia o el calor en un área

específica son inferiores a un nivel establecido; o adquirir una opción *call* que las indemniza monetariamente si, por el contrario, la lluvia o el calor en dicha área son superiores al nivel establecido (Alaton et al., 2002, pp. 1-5). Este tipo de contratos permite a las empresas de sectores como el energético, turístico y agrícola asegurarse directamente contra las variables climáticas que puedan afectar sus rendimientos.

Derivados Climáticos

A continuación, se presenta la metodología de Turvey (2001) para estructurar un derivado climático. Primero se debe determinar la sensibilidad de la producción agrícola con respecto a las variables climáticas estudiadas dejando constantes los demás factores de producción, en este caso se toman la lluvia y calor con respecto a la producción de papa en Colombia, para lo cual se plantea una función Cobb-Douglas (1928) ajustada de la siguiente forma:

$$Y = AR^{\beta_1}H^{\beta_2}$$

(Ecuación 1)

Donde A es un parámetro tecnológico o de eficiencia de los factores, Y es la producción en toneladas por hectárea cultivada, R la lluvia diaria acumulada y H la temperatura diaria promedio. β_1 y β_2 son los parámetros por encontrar y representan los pesos relativos de cada factor climático en la producción total.

La ecuación 1 se log-linealiza de forma que se puedan obtener los parámetros a estimar, evaluar su significancia y encontrar valores críticos mediante una regresión de mínimos cuadrados ordinarios con la siguiente especificación:

$$\ln(Y) = \ln(A) + \beta_1 * \ln(R) + \beta_2 * \ln(H)$$

(Ecuación 2)

A partir de las condiciones técnicas requeridas para el cultivo de papa que se estudiaron anteriormente y la revisión de las condiciones climáticas históricas en la sabana de Cundinamarca, se pueden obtener intervalos de confianza para definir unos puntos de inflexión $F_{(i)}$ hasta los cuales las variables climáticas determinadas no afectan significativamente el rendimiento del cultivo. Así se definen las medidas de interés *Heating Degree Day (HDD)* y *Cooling Degree Day (CDD)*²:

$$HDD_t = \max(F_{HDD} - T(t), 0)$$

(Ecuación 3)

$$CDD_t = \max(0, T(t) - F_{CDD})$$

(Ecuación 4)

Donde $T(t)$ es la temperatura media en el periodo t medida en grados centígrados, y en esas mismas unidades se define el respectivo punto de inflexión. A continuación, se definen las funciones acumulativas:

$$HDD \text{ acumulados} = \sum_{t=1}^n HDD_t$$

(Ecuación 5)

$$CDD \text{ acumulados} = \sum_{t=1}^n CDD_t$$

(Ecuación 6)

Con estas variables se puede definir un vector de valores o índice ponderado como *Strike Index (S)*, la cantidad de unidades de variación acumuladas y ponderadas que el productor puede tolerar en esta variable. El cálculo del *pay-off* se fundamenta en el modelo analítico de Black-

² El punto de inflexión seleccionado para los HDD y CDD tradicionales es 65°F o 18,3°C, este es considerado como el punto en el cual se encienden los aires acondicionados en los hogares dado su uso inicial en la industria energética de Estados Unidos (Chicago Mercantile Exchange Group, 2016)

Scholes (Merton, 1973) y resulta de multiplicar un factor de monetización ϕ_p por la diferencia positiva entre el vector de funciones acumulativas realizadas, X , y el *Strike Index*:

$$Unidades\ in\ the\ money_t = \max (X_t - S, 0)$$

(Ecuación 7)

Finalmente, se debe aproximar la función de distribución del *pay-off* para calcular la prima de la siguiente forma:

$$Prima_{call} = \phi * \int_S^{\infty} (X - S) * f(X) d(X) \text{ para } X > S$$

(Ecuación 8)

$$Prima_{call} = \phi * E\{\max (X - S, 0)\}$$

(Ecuación 9)

Donde ϕ_p es el pago por cada unidad de variación acumulada y monetiza el efecto estimado de un cambio en el índice de variables climáticas sobre los ingresos de los cultivadores de papa representado globalmente por ϕ , y descuenta los flujos futuros en un horizonte de tiempo t a partir de una tasa libre de riesgo r :

$$\phi_p = \phi * e^{-rt}$$

(Ecuación 10)

Se prevén dos grandes dificultades en el desarrollo de esta metodología, la primera es la aproximación a la función de distribución del *pay-off* pues el subyacente no necesariamente se distribuye normalmente. La otra dificultad es la determinación del factor de monetización pues puede involucrar una negociación y los ingresos de los productores dependen de factores

heterogéneos como la implementación de tecnologías, el uso de factores de producción y los precios de mercado que pueden variar a lo largo del tiempo, esto requiere la reevaluación del instrumento para cada ubicación temporal y espacial específica.

Metodología

El planteamiento de un producto de cobertura financiera útil para los riesgos asociados al clima inicia con una caracterización de las condiciones climáticas relevantes mediante mediciones localizadas geográficamente, esta información se obtendrá de la base de datos de las estaciones hidrológicas del IDEAM³. En este caso se tomarán mediciones de temperatura en la sabana de Cundinamarca y se evaluará su distribución de estas variables para aproximarlas estadísticamente.

A continuación, se deben estimar los efectos de estas condiciones climáticas sobre el cultivo de papa para lo cual se realizará una regresión *Cobb-Douglas* ajustada tomando las mediciones de producción y precio de la papa del Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del sector agropecuario (SIPSA) del DANE⁴. En este punto es posible estructurar el instrumento para la gestión del riesgo climático con base en la distribución aproximada de la temperatura como variable climática subyacente y el efecto encontrado sobre la productividad local en el cultivo de la papa, esto permitirá valorarlo acorde al modelo de derivado climático planteado.

³ Los datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se encuentran en datos.gov.co

⁴ Los datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) se encuentran en dane.gov.co

Finalmente, se debe evaluar los posibles impactos sociales y económicos del instrumento propuesto mediante un análisis de costo-beneficio para el productor y de la viabilidad como producto financiero en el mercado colombiano.

Condiciones Climáticas para el Cultivo de Papa en Colombia

Los fenómenos conocidos como heladas son producidas gracias al descenso significativo de la temperatura en la madrugada. Estas mismas son fruto de la alta concentración de radiación y temperatura en el suelo del día anterior, cuya temperatura desciende a causa de la liberación de calor y humedad en el ambiente. Por ende, la temperatura interna de las hojas, plantas y del entorno llega a niveles inferiores al punto de congelación del agua (0°C).

Cabe resaltar que no es indispensable que la temperatura se encuentre por debajo de cero grados para que las plantas comiencen a sufrir daños ya que, bajo determinadas condiciones, la temperatura interna de la hoja puede ser más baja que la del aire lo que trae consecuencias devastadoras para la hoja y por ende la misma muere.

En Colombia las heladas causan millonarias pérdidas a la agricultura, especialmente en el altiplano cundiboyacense y los altiplanos de Túquerres e Ipiales en Nariño, lo cual tiene una relación directa con los cultivos producidos de hortalizas, flores, maíz, y papa (González y Torres, 2012, p.9). Se da una gran afectación en las áreas localizadas a más de 2.500 m.s.n.m.; las heladas se dan cuando la temperatura del aire cae a 0°C o menos, a una altura entre los 1.250 m.s.n.m. y 2.000 m.s.n.m. sobre el nivel del suelo y llega al punto de congelación del agua afectando de manera irreversible los organismos vegetales.

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en Colombia a las heladas se les atribuyen pérdidas económicas en el sector de la agricultura y la ganadería. Las consecuencias para la planta y cultivo varían bajo ciertos aspectos fisiológicos de la planta tales como su susceptibilidad al frío, el momento del desarrollo del cultivo y la altura con respecto al suelo. Para la cadena de producción del cultivo de papa la temperatura óptima está entre los 17°C y 23°C (INTAGRI, 2017), sin embargo, al presentarse una variación inferior a los 14°C o superior a los 25°C se pueden afectar gravemente el crecimiento y la tuberización de la papa (Vélez Betancourt, 2021).

Estos requerimientos de temperatura particulares para el desarrollo del cultivo papa significan que el fenómeno conocido como heladas, en el cual las temperaturas promedio son inferiores a 14°C, y que se presenta en la zona cundiboyacense afecta gravemente el rendimiento del cultivo de papa.

Datos climáticos y distribución del subyacente

Para aproximar la temperatura a la cual están expuestos los cultivos en la sabana de Bogotá se usan los *Datos Hidrometeorológicos Crudos del IDEAM (2023)* y se obtienen promedios diarios de temperatura entre octubre 1 de 2014 y marzo 31 de 2023 a partir de mediciones en grados centígrados a dos metros del suelo por intervalos de una hora de la estación climatológica ubicada en El Dorado – Catam (4.70558333, -74.15066667). De esta forma, se obtiene una temperatura diaria promedio de 14,57°C con una desviación estándar de 0,82°C, un valor mínimo de 11,81°C y un valor máximo de 17,63°C, y la variable se puede caracterizar aproximadamente como una distribución normal.

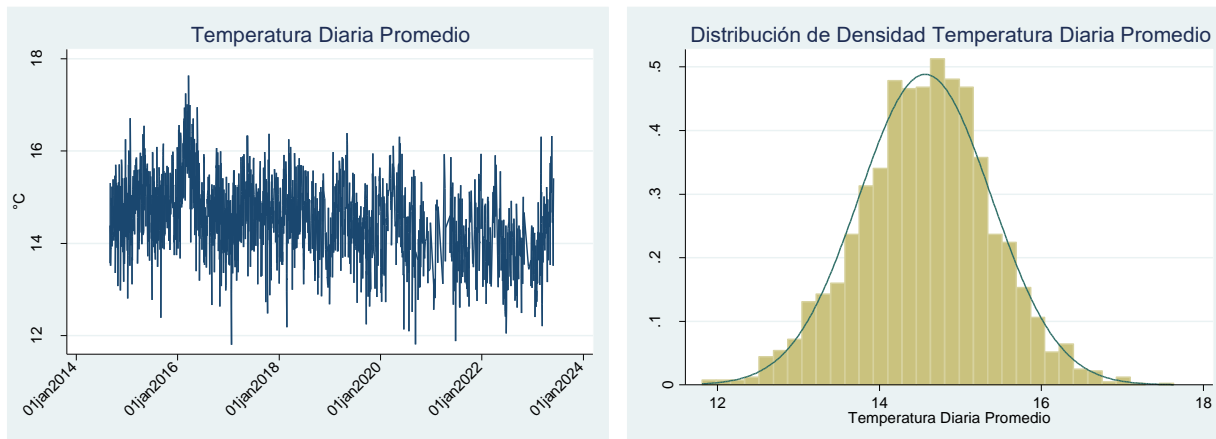


Ilustración 2. Temperatura Diaria Promedio entre septiembre 1 de 2014 y mayo 31 de 2023 (elaboración propia).

Ilustración 3. Comparativo entre la distribución de densidad de la temperatura diaria promedio y una curva de distribución normal con $\mu=14,57$ y $\sigma=0,82$ (elaboración propia).

Cabe resaltar que a la información de acceso público presenta fechas con datos faltantes los cuales no se toman en cuenta para la caracterización de la variable, pero que podrán afectar el cálculo de HDD o CDD acumulados si durante dichas fechas específicas la temperatura promedio superó el umbral establecido en cada caso. Esto pone en evidencia la necesidad de acumular datos confiables y constantes para la medición tanto del subyacente climático como de su efecto económico, como también lo advierte Segura Riveiro (2022), inconveniente que se puede mitigar negociando el acceso a los datos directamente con una fuente fidedigna e imparcial a juicio de las partes, y en últimas, socializando con los consumidores el alcance limitado y riesgo remanente que siempre existe con este tipo de productos⁵.

⁵ Dada la estructura del seguro paramétrico, siempre se presenta un Riesgo Base que es la diferencia entre la pérdida real y la compensación generada por el producto, este puede ser adverso o favorable para el asegurado y sólo puede mitigarse aproximando lo más posible la pérdida esperada con mejores datos y modelos (PNUD, 2023).

Dadas estas condiciones climatológicas para la sabana de Bogotá, se puede inferir que el riesgo climático para el cultivo de papa se concentra en las temperaturas bajas, particularmente en las heladas que estropean los tubérculos. De esta forma se propone un HDD modificado (HDD*)⁶ con una temperatura de 14°C como punto de inflexión para el subyacente climático dado que esta es la temperatura mínima para un crecimiento óptimo del cultivo (Vélez Betancourt, 2021).

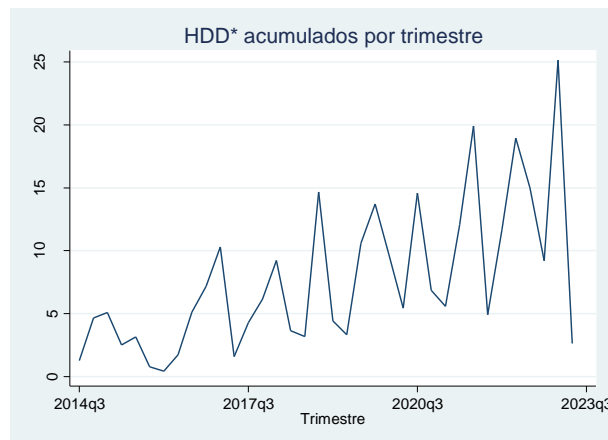


Ilustración 4. HDD* acumulados trimestralmente entre octubre de 2014 y marzo de 2023 (elaboración propia).

La distribución de probabilidad para los HDD* acumulados se puede aproximar por medio de una función Gamma, esta es utilizada con frecuencia para modelar variables aleatorias no negativas y sesgadas como lo son los intervalos entre múltiples eventos repetitivos o sus frecuencias en un intervalo de tiempo determinado (Wackerly et al., 2002). En este caso, si bien la temperatura diaria promedio en la sabana de Bogotá se distribuye de forma aproximadamente

⁶ Alternativamente, se puede plantear el subyacente como un Growing Degree Day (GDD) inverso, parámetro utilizado para estimar el crecimiento de determinados cultivos ante un mínimo de temperatura requerida por estos. <https://extension.psu.edu/understanding-growing-degree-days>

normal, el evento se define al poner una cota a dicha temperatura promedio sobre los 14°C y agregarla trimestralmente, lo que resulta en una variable no negativa y sesgada hacia el origen.

Las estadísticas descriptivas obtenidas para los HDD* acumulados son una media (μ) de 7,74 y una desviación estándar (σ) de 5,94, para especificar la función de distribución se calculan con estos valores los parámetros $\alpha=1,7$ y $\beta=4,6$ tales que $\mu=\alpha\beta$ y $\sigma^2=\alpha\beta^2$, α es conocido como el *parámetro de forma* de la función Gamma pues determina su sesgo y β es conocido como el *parámetro de escala* pues determina su tamaño en unidades (Wackerly et al., 2002). Esta función representa efectivamente eventos de baja magnitud con una alta frecuencia y un decaimiento rápido de la probabilidad a medida que aumenta la magnitud.

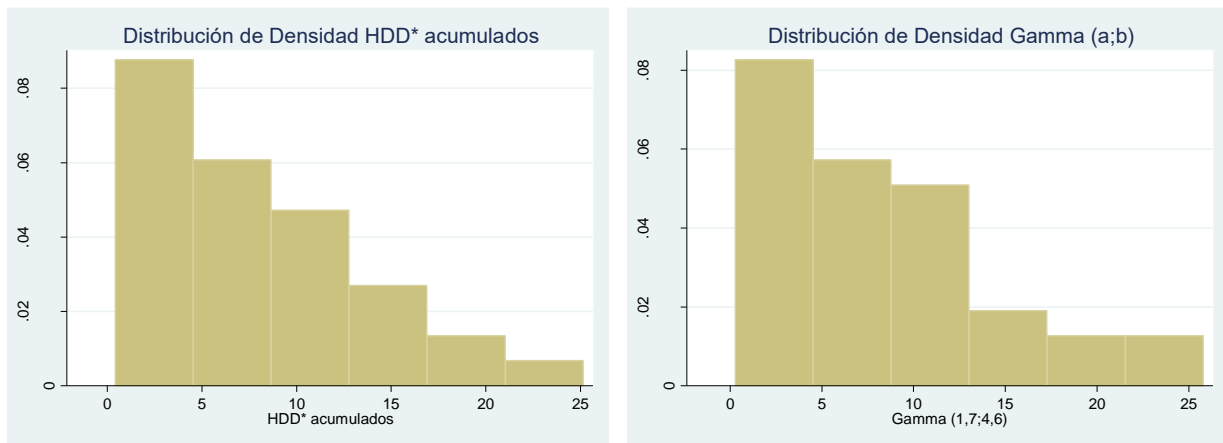
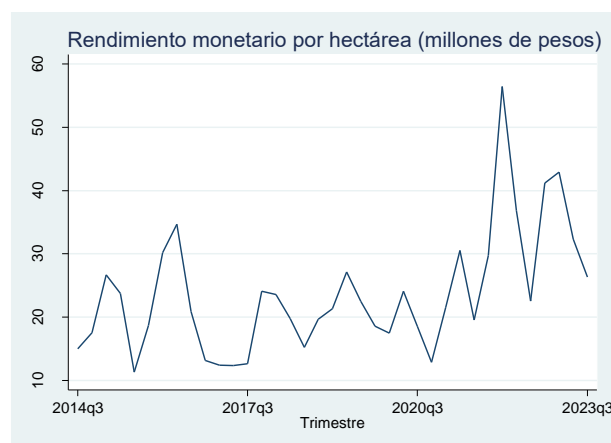


Ilustración 5. Distribución de densidad de los HDD acumulados calculados (elaboración propia).*

Ilustración 6. Distribución de densidad de una variable aleatoria generada con una función de distribución Gamma con $\alpha=1,7$ y $\beta=4,6$ (elaboración propia).

A continuación, se toma el precio promedio por kilogramo de la papa superior en la plaza de Corabastos de Bogotá del *Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario Componente de Precios Mayoristas* del DANE (2023) para estimar el rendimiento monetario por hectárea del cultivo, se toma esta variedad de papa por ser la más vendida en kilogramos en esta plaza. El precio de la papa presenta una volatilidad significativa en el periodo entre octubre 1 de 2014 y marzo 31 de 2023 con un promedio de \$ 1.182 por Kg y una desviación estándar de \$530 por Kg, el valor mínimo que toma durante el periodo es de \$506 por Kg y el máximo es de \$3.007 por Kg.

Finalmente, a partir de los datos de la más reciente *Encuesta Nacional Agropecuaria* del DANE (2019) se estima el rendimiento promedio para el cultivo de papa en Colombia en 20 toneladas por hectárea, en línea con lo encontrado por Santos Díaz et al. (2022), esto es multiplicado por el precio promedio por Kg de papa para el periodo inmediatamente anterior para calcular el rendimiento monetario por hectárea del cultivo, que será el máximo valor por asegurar en cada periodo. Este valor permitirá aproximar el factor monetario necesario para proponer un derivado climático ante la falta de datos suficientes para estimar la sensibilidad marginal de la producción al factor climático con una función tipo Cobb-Douglas como lo hace Turvey (2001).



Propuesta de derivado climático

La caracterización previa de la variable subyacente permite definir el producto derivado tipo *Call* a partir de un HDD modificado (HDD*) con un punto de inflexión en 14°C como evento climático a asegurar y una periodicidad trimestral para los contratos dadas las condiciones óptimas y el ciclo de crecimiento del cultivo. Adicionalmente, se establecen los parámetros faltantes, strike y factor de monetización, para el aseguramiento de una hectárea cultivada con papa de referencia superior con la metodología *burn-rate*, es decir, a partir de los datos históricos (Turvey, 2001).

El strike, S , en este caso se define como el percentil 90 del histórico de HDD* acumulados con la intención de aproximar una cota según la cual se asegure el 10% de los casos más extremos de variación climática. Este parámetro, sin embargo, se debe negociar con los asegurados a partir del impacto real del riesgo climático en sus negocios e ir ajustándose a medida que se refleje un cambio climático en los datos.

El factor de monetización, ϕ , en este caso se define como el rendimiento monetario por hectárea estimado para el periodo anterior en proporción a la máxima diferencia histórica entre los HDD* acumulados y el Strike. El rendimiento monetario estimado por hectárea resulta de multiplicar el precio de la papa superior en Corabastos por el rendimiento nominal de 20 toneladas por hectárea.

De esta forma se busca que el pago máximo posible sea igual al potencial de producción total del cultivo, es decir, que en el caso más extremo se cubra la pérdida total de este. Cabe anotar, que este factor en últimas dependerá de las condiciones de mercado y de una negociación entre el

asegurador y los asegurados. A continuación, se presenta un ejemplo numérico para el periodo entre enero y marzo de 2023 dado que este es el último para el cual se tienen datos completos y, adicionalmente, en él las autoridades levantaron alertas por heladas⁷.

$$\emptyset_{2023Q1} = \frac{R_{2022Q4}}{(\max(HDD^*acumulados) - S)}, \text{ donde } S = 14,99 \text{ HDD}^* \text{ acumulados}$$

(Ecuación 11)

$$\$4.057.098 = \frac{\$41.196.456}{10,15}$$

(Ecuación 12)

La prima del producto se deriva de la ecuación 8 y se calcula de la siguiente forma:

$$Prima_{2023Q1} = \emptyset_{2023Q1} * E\{\max(HDD^*acumulados_{2023Q1} - S, 0)\}$$

(Ecuación 13)

$$\$2.086.116 = \$4.057.098 * 0,51$$

(Ecuación 14)

Finalmente, se calcula el pago de los derechos generados en ausencia del valor del dinero en el tiempo para simplificar el ejercicio dado el corto plazo del contrato y su ámbito de aplicación. Para el caso específico del primer trimestre de 2023, con un factor de monetización de \$4.057.098 se calcula una prima de \$2.086.116 y se estima que el pago al asegurado será menor a \$2.667.055

⁷ Como se reportó en las noticias locales a principios de 2023.
<https://www.infobae.com/colombia/2023/01/27/alertan-a-los-campesinos-para-que-tomen-medidas-de-proteccion-en-sus-cultivos-por-bajas-temperaturas/>

con un nivel de confianza del 90% (acorde a la distribución gamma con la que se caracterizó anteriormente los HDD* acumulados):

$$P(\text{Unidades in the money} \leq 0,66) = 90\% \quad \text{Payoff}_t = \Phi_t * \text{Unidades in the money}_t$$

(Ecuación 15)

(Ecuación 16)

Al revisar la cantidad efectiva de HDD* acumulados entre enero y marzo de 2023, que fue un trimestre atípico por las heladas que alertaron las autoridades, hubo 10,15 unidades *in the money*, por lo que el pago real al asegurado en este periodo hubiera sido de \$41.196.456.

Conclusiones

Al plantear este producto con los agricultores en mente se realizó un análisis de las condiciones óptimas para el cultivo de la papa, se estableció un modelo analítico siguiendo a los autores que han hecho contribuciones teóricas y prácticas en el tema, y se diseñó una metodología para la valoración de derivados de clima en la sabana de Bogotá a partir de intentos previos de implementar productos similares. Finalmente, se caracterizó la temperatura en la zona y se aproximó el mínimo tolerado por los productores, todo esto para el cálculo de la prima y el pago esperado de un producto para servir a esta comunidad. Las conclusiones son las siguientes:

- Las condiciones térmicas idóneas para el cultivo de papa en el territorio cundiboyacense colombiano son entre 17°C y 23°C, lo cual permite que haya un adecuado crecimiento de la planta, su tuberización y que por ende no se afecte la cadena de producción para el cultivo de la papa. Variaciones inferiores a los 14°C y superiores a los 25°C afectan significativamente el desarrollo del cultivo.

- La temperatura diaria promedio medida en la sabana de Bogotá entre octubre 1 de 2014 y marzo 31 de 2023 presenta una media de $14,57^{\circ}\text{C}$ y se comporta aproximadamente como una variable aleatoria de distribución normal.
- Dadas las condiciones climáticas de la zona y las particularidades del cultivo de papa, se propone un subyacente de tipo HDD modificado (HDD*), con el punto de inflexión en 14°C , para un derivado climático. Estos datos no negativos y sesgados hacia el origen se aproximan a una variable aleatoria generada por una función de distribución tipo Gamma.
- Con el fin de asegurar una hectárea cultivada con papa de referencia superior se plantea un producto de tipo derivado climático con el HDD modificado (HDD*) como evento climático de interés, para este producto se definen un factor de monetización ajustable por periodo y un strike a partir de los datos históricos. Finalmente, se presenta un ejemplo numérico a partir de datos de acceso público recientes.
- La implementación de un instrumento de cobertura como el derivado climático planteado les permite a los productores de papa fijar, mediante un contrato, la temperatura mínima tolerada para su cultivo y recibir un pago indemnizatorio por cada grado centígrado en la temperatura promedio observada por debajo de esta. Esto les brinda una herramienta viable para mitigar sus riesgos y pérdidas inesperadas de forma asertiva.

Listado de referencias

- Aghion, P., Dewatripont, M., & Rey, P. (1994). Renegotiation Design with Unverifiable Information. *Econometrica*, 62(2), 257–282. <https://doi-org.cvirtual.cesa.edu.co/10.2307/2951613>
- Alaton, P., Djehiche, B., & Stillberger, D. (2002). On modelling and pricing weather derivatives. *Applied mathematical finance*, 9(1), 1-20.
- Allou-Alfonse, A., Trejo-García, J. C., & Martínez-García, M. Á. (2018). Opción climática para la producción de café en México. *Ensayos - Revista de Economía*, 37(2), 135–154. <https://doi-org.cvirtual.cesa.edu.co/10.29105/ensayos37.2-1>
- Alva-Vázquez, A., & Sierra-Juárez, G. (2010). Opciones climáticas para el sector pesquero del pacífico mexicano. *Panorama Económico*, 6(11), 29-61.
- Climent Hernández, J. A., & Rodríguez Benavides, D. (2021). Valuación de opciones sobre índices de la temperatura de la Ciudad de México. *Contaduría y Administración*, 66(3), 1–28. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2021.2722>
- Chicago Mercantile Exchange Group. Weather Options Overview. <https://www.cmegroup.com/education/articles-and-reports/weather-options-overview.html>
- Cobb, C. W., & Douglas, P. H. (1928). A theory of production.
- Cruz, J.S., & Llinas, A. (2010). Modelo analítico de derivados de clima para eventos específicos de riesgo en la agricultura en Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 7(64), 121–147.
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2019). Encuesta nacional agropecuaria (ENA) Históricas. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por->

[tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena/encuesta-nacional-agropecuaria-por-departamentos#i-censo-nacional-del-cultivo-de-papa](#) (consultado el 26 de agosto de 2023).

DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2023). Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario Componente de Precios Mayoristas – SIPSA_P - 2013 -2021. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censos-agropecuarios-en-colombia> (consultado el 26 de agosto de 2023).

FASECOLDA – Federación de Aseguradores Colombianos (2022). Seguros paramétricos en Colombia. <https://biblioteca.fasecolda.com/cgi-bin/koha/opac-retrieve-file.pl?id=e75981fda5a87007806786aba49fa87e>

Fama, E. F. (1990). Contract Costs and Financing Decisions. *The Journal of Business*, 63(1), S71–S91.

Hart, O. (1995). Firms, contracts, and financial structure. *Clarendon press*, capítulo 4.

Hong, H., Li, F. W., & Xu, J. (2019). Climate risks and market efficiency. *Journal of Econometrics*, 208(1), 265-281.

Hull, J. C. (2018). Options, futures, and other derivatives (10th edition). *Pearson*.

IDEAM – Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2023). *Datos Hidrometeorológicos Crudos - Red de Estaciones IDEAM: Temperatura*. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Datos-Hidrometeorol-gicos-Crudos-Red-de-Estaciones/sbwg-7ju4> (consultado el 26 de agosto de 2023).

INTAGRI – Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura (2017). Requerimientos de Clima y Suelo para el Cultivo de la Papa. Serie Hortalizas. Núm. 10. Artículos Técnicos de INTAGRI.

México. 3 p. <https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/requerimientos-de-clima-y-suelo-para-el-cultivo-de-la-papa>

Lizarazo Rengifo, C. H. (2016). Diseño de un instrumento de cobertura sobre el comportamiento del precio de la papa Diacol Capiro, para el pequeño y mediano productor, a partir del mejor pronóstico entre un modelo SARIMA y una RNA. *Universidad Piloto de Colombia*.

López, L., Carreño, S. & Uribe, S. C. (2013). Diseño de un producto derivado climático para la piña en Santander. <http://hdl.handle.net/20.500.12749/15908>

López Domínguez, I., & Velázquez Boeta, R. (2020). Impacto del riesgo climático en las actividades económicas. Análisis del sector líneas aéreas. *Contabilidad y Negocios*, 15(29), 40–57.
<https://doi-org.cvirtual.cesa.edu.co/10.18800/contabilidad.202001.003>

Medina Granados, R. (2016). Derivados sobre el clima. <http://hdl.handle.net/11201/147574>

Merton, R. C. (1973). Theory of rational option pricing. *The Bell Journal of economics and management science*, 141-183.

Montes, S (2021). ¿Cuáles son las mejores condiciones para la temporada de siembras en Colombia? Recuperado de: <https://www.agronegocios.co/agricultura/cuales-son-las-mejores-condiciones-para-la-temporada-de-siembras-en-colombia-3126135>

Muchnik, E., & Tejo, P. (1997). La papa en el comercio regional y en los acuerdos comerciales. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/30815-la-papa-comercio-regional-acuerdos-comerciales>

PNUD – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2023). Colombia: El Desarrollo del Seguro Paramétrico. *Documento de Desarrollo 002/2023*.

https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-07/undp_co_doc_desarrollo_desarrollo_parametrico_jul19_2023.pdf

Santos Díaz, A., Gómez Arias, L., Pedraza Rute, R., Gómez Latorre, D. A., Bohórquez Caballero, G. L., Ureña Sosa, D. F., Gómez Rodríguez, K., Villagrán, E. A., Numa Vergel, S., & Gómez Vargas, Y. (2022). Aspectos generales del cultivo de papa en Cundinamarca. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (agrosavia)*.

SIC – Superintendencia de industria y comercio de Colombia SIC (2011). Cadena productiva de la papa: diagnóstico de libre competencia. <https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/PAPA.pdf>

Tirole, J. (1986). Procurement and Renegotiation. *Journal of Political Economy*, 94(2), 235–259.

Turvey, C. G. (2001). Weather Derivatives for Specific Event Risks in Agriculture. *Review of Agricultural Economics*, 23(2), 333–351.

Vargas Arayón, J. C., & Ríos Castro, N. A. (2017). Valoración de opciones climáticas: una aplicación para el sector arrocero de Yopal (Colombia). *ODEON - Observatorio de Economía y Operaciones Numéricas*, 12, 55–75.

Vélez Betancourt, A. F. (2021). Cadenas sostenibles ante un clima cambiante. La papa en Colombia. *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*

Villarreal Navarro, J. E. (2006). Análisis de riesgo financiero para el sector de la papa en Colombia. *Universidad de los Andes*.

Segura Riveiro, F.M. (2022). Los seguros paramétricos. Enfrentando críticas y asumiendo algunos desafíos. *Revista Ibero-Latinoamericana de seguros*, 31(57), 187-198.

<https://doi.org/10.11144/Javeriana.ris57.spec>

Rubio, C. O. A., Rangel, G. J., Flores, L. R., Magallanes, G. J. V., Díaz, H. C., Zavala, Q. T., ... &

Paredes, T. A. (2000). Manual para la producción de papa en las sierras y valles altos del centro de México. *SAGARINIFAP-CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Libro Técnico, (1)*.

Román Cortez, M., & Hurtado, G. (2002). Guía técnica Cultivo de la Papa. *San Salvador: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal CENTA*.

Wackerly Dennis, D., Mendenhall, W & Scheaffer, R. (2002). Estadística Matemática con Aplicaciones. *Cengage Learning*.

Anexo

Trimestre	HDD acumulados	Días en el periodo	Temperatura promedio	Precio promedio	Precio mínimo	Precio máximo	Rendimiento por hectárea	Factor de monetización	Unidades On the money	Prima	Payoff
2014q4	4,65	91	14,61	\$ 877	\$ 640	\$ 1.300	\$ 17.533.538	\$ 1.476.689	0,00	\$ 759.298	\$ -
2015q1	5,09	86	14,77	\$ 1.335	\$ 1.100	\$ 1.900	\$ 26.692.062	\$ 1.726.733	0,00	\$ 887.868	\$ -
2015q2	2,53	91	14,99	\$ 1.189	\$ 740	\$ 2.000	\$ 23.775.240	\$ 2.628.680	0,00	\$ 1.351.639	\$ -
2015q3	3,15	92	14,75	\$ 567	\$ 440	\$ 920	\$ 11.346.970	\$ 2.341.427	0,00	\$ 1.203.937	\$ -
2015q4	0,77	92	14,89	\$ 934	\$ 560	\$ 1.800	\$ 18.671.014	\$ 1.117.469	0,00	\$ 574.591	\$ -
2016q1	0,43	91	15,77	\$ 1.509	\$ 1.200	\$ 1.700	\$ 30.185.866	\$ 1.838.754	0,00	\$ 945.467	\$ -
2016q2	1,73	91	15,20	\$ 1.734	\$ 1.500	\$ 2.200	\$ 34.683.076	\$ 2.972.756	0,00	\$ 1.528.559	\$ -
2016q3	5,12	81	14,59	\$ 1.044	\$ 500	\$ 1.900	\$ 20.888.860	\$ 3.415.649	0,00	\$ 1.756.290	\$ -
2016q4	7,19	92	14,58	\$ 657	\$ 520	\$ 860	\$ 13.138.481	\$ 2.057.171	0,00	\$ 1.057.775	\$ -
2017q1	10,29	86	14,38	\$ 621	\$ 560	\$ 760	\$ 12.411.428	\$ 1.293.900	0,00	\$ 665.310	\$ -
2017q2	1,60	91	14,99	\$ 618	\$ 500	\$ 800	\$ 12.367.368	\$ 1.222.299	0,00	\$ 628.493	\$ -
2017q3	4,30	89	14,72	\$ 633	\$ 500	\$ 880	\$ 12.657.747	\$ 1.217.960	0,00	\$ 626.262	\$ -
2017q4	6,17	72	14,65	\$ 1.204	\$ 900	\$ 1.500	\$ 24.074.856	\$ 1.246.557	0,00	\$ 640.966	\$ -
2018q1	9,24	83	14,62	\$ 1.180	\$ 1.000	\$ 1.500	\$ 23.605.278	\$ 2.370.933	0,00	\$ 1.219.109	\$ -
2018q2	3,64	61	14,66	\$ 989	\$ 600	\$ 1.300	\$ 19.785.406	\$ 2.324.688	0,00	\$ 1.195.330	\$ -
2018q3	3,20	49	14,54	\$ 761	\$ 600	\$ 900	\$ 15.229.474	\$ 1.948.501	0,00	\$ 1.001.898	\$ -
2018q4	14,66	56	14,10	\$ 982	\$ 760	\$ 1.340	\$ 19.638.666	\$ 1.499.825	0,00	\$ 771.194	\$ -
2019q1	4,43	64	14,57	\$ 1.067	\$ 900	\$ 1.300	\$ 21.347.222	\$ 1.934.050	0,00	\$ 994.468	\$ -
2019q2	3,33	62	14,69	\$ 1.357	\$ 1.160	\$ 1.600	\$ 27.147.324	\$ 2.102.311	0,00	\$ 1.080.986	\$ -
2019q3	10,60	70	14,19	\$ 1.125	\$ 900	\$ 1.500	\$ 22.491.948	\$ 2.673.515	0,00	\$ 1.374.693	\$ -
2019q4	13,72	62	14,23	\$ 930	\$ 700	\$ 1.200	\$ 18.595.882	\$ 2.215.046	0,00	\$ 1.138.953	\$ -
2020q1	9,66	54	14,54	\$ 874	\$ 600	\$ 2.000	\$ 17.474.474	\$ 1.831.354	0,00	\$ 941.663	\$ -
2020q2	5,43	48	14,68	\$ 1.204	\$ 900	\$ 1.500	\$ 24.083.174	\$ 1.720.916	0,00	\$ 884.877	\$ -
2020q3	14,59	51	14,05	\$ 928	\$ 600	\$ 1.300	\$ 18.561.892	\$ 2.371.752	0,00	\$ 1.219.530	\$ -
2020q4	6,87	33	14,06	\$ 643	\$ 500	\$ 800	\$ 12.858.904	\$ 1.828.007	0,00	\$ 939.942	\$ -
2021q1	5,58	11	13,86	\$ 1.078	\$ -	\$ 1.660	\$ 21.568.420	\$ 1.266.367	0,00	\$ 651.152	\$ -
2021q2	12,07	45	14,21	\$ 1.526	\$ 800	\$ 2.600	\$ 30.521.844	\$ 2.124.095	0,00	\$ 1.092.187	\$ -
2021q3	19,90	59	13,85	\$ 979	\$ 700	\$ 1.200	\$ 19.572.658	\$ 3.005.844	4,90	\$ 1.545.573	\$ 14.741.168
2021q4	4,93	43	14,43	\$ 1.488	\$ -	\$ 2.400	\$ 29.755.386	\$ 1.927.549	0,00	\$ 991.125	\$ -
2022q1	11,66	52	14,16	\$ 2.822	\$ 2.300	\$ 3.200	\$ 56.430.000	\$ 2.930.362	0,00	\$ 1.506.761	\$ -
2022q2	18,96	42	13,88	\$ 1.841	\$ 960	\$ 3.200	\$ 36.821.820	\$ 5.557.324	3,97	\$ 2.857.517	\$ 22.044.048
2022q3	14,99	45	13,84	\$ 1.127	\$ 900	\$ 1.400	\$ 22.549.350	\$ 3.626.276	0,00	\$ 1.864.593	\$ -
2022q4	9,21	32	13,88	\$ 2.060	\$ 1.360	\$ 2.800	\$ 41.196.456	\$ 2.220.699	0,00	\$ 1.141.860	\$ -
2023q1	25,15	65	13,85	\$ 2.147	\$ 1.400	\$ 2.800	\$ 42.933.160	\$ 4.057.098	10,15	\$ 2.086.116	\$ 41.196.456

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Área cosechada en miles de hectáreas y producción en millones de toneladas de papa en Colombia entre los años 2010 y 2022 (Elaboración propia con datos de https://www.agronet.gov.co).....	6
Ilustración 2. Temperatura Diaria Promedio entre septiembre 1 de 2014 y mayo 31 de 2023 (elaboración propia).....	27
Ilustración 3. Comparativo entre la distribución de densidad de la temperatura diaria promedio y una curva de distribución normal con $\mu=14,57$ y $\sigma=0,82$ (elaboración propia).	27
Ilustración 4. HDD* acumulados trimestralmente entre octubre de 2014 y marzo de 2023 (elaboración propia).....	28
Ilustración 5. Distribución de densidad de los HDD* acumulados calculados (elaboración propia).	29
Ilustración 6. Distribución de densidad de una variable aleatoria generada con una función de distribución Gamma con $\alpha=1,7$; y $\beta=4,6$ (elaboración propia).	29
Ilustración 7. Rendimiento monetario por hectárea entre octubre 1 de 2014 y marzo 31 de 2023 (elaboración propia).....	31

Índice de tablas

Tabla 1. Requisito de temperatura en el ambiente para el cultivo de papa por etapa de desarrollo (INTAGRI., 2017).	8
Tabla 2. Requisitos de temperatura en el suelo para el cultivo de papa por etapa de desarrollo. (INTAGRI., 2017).	9

Índice de ecuaciones

(Ecuación 1).....	21
(Ecuación 2).....	22
(Ecuación 3).....	22
(Ecuación 4).....	22
(Ecuación 5).....	22
(Ecuación 6).....	22
(Ecuación 7).....	23
(Ecuación 8).....	23
(Ecuación 9).....	23
(Ecuación 10).....	23
(Ecuación 11).....	32
(Ecuación 12).....	32
(Ecuación 13).....	32
(Ecuación 14).....	32
(Ecuación 15).....	33
(Ecuación 16).....	33