

# Trabajo Final de Graduación

## Maestría en Finanzas UTDT

*Año Académico 2017*

*Alumno: Tomás Oberst*

*Tutor: Nicolás Merener*

*Derivados Climáticos: ¿Son un instrumento útil para mitigar el riesgo del productor agrícola?*

## Índice

|  |    |
|--|----|
| <b>1. Abstract</b> .....   | 3  |
| <b>2. Introducción</b> .....   | 4  |
| 2.1 Objetivos y metodología .....  | 5  |
| <b>3. Marco teórico</b> .....  | 7  |
| 3.1 Derivados financieros .....  | 7  |
| 3.1.1 Tipos de Derivados financieros .....                                     | 8  |
| 3.2 Riesgo climático .....   | 10 |
| 3.3 Historia de los Derivados Climáticos .....                                 | 10 |
| 3.4 Mercado de Derivados Climáticos .....                                      | 13 |
| 3.4.1 Tipos de contratos de Derivados Climáticos .....                         | 16 |
| 3.4.2 Variables e índices climáticos .....                                     | 17 |
| 3.5 Derivados Climáticos en la Agricultura .....                               | 20 |
| 3.5.1 Ventajas, desventajas y diferencias con seguros tradicionales .....      | 21 |
| 3.6 Métodos de valuación de Derivados Climáticos .....                         | 23 |
| 3.6.2 <i>Market based o arbitrage pricing</i> .....                            | 26 |
| 3.6.3 <i>Black-Scholes</i> .....   | 26 |
| 3.6.4 Modelos de valuación de Derivados Climáticos sobre precipitaciones ..... | 27 |
| <b>4. Modelo de valuación de la opción climática</b> .....                     | 29 |
| 4.1 Función de producción .....  | 30 |
| 4.2 Test sobre meses significativos .....                                      | 31 |
| 4.2.1 Regiones y cultivos .....  | 32 |
| 4.2.2 Rindes y precipitaciones .....   | 33 |
| 4.2.3 Resultados y análisis de meses significativos .....                      | 33 |
| 4.3 Definición del derivado .....  | 35 |
| 4.3.1 Función de pagos y precio del <i>put</i> .....                           | 35 |
| 4.3.2 Simulación de precipitaciones .....                                      | 36 |
| 4.4 Ejemplos .....   | 38 |
| 4.4.1 Soja Iowa Agosto .....   | 39 |
| 4.4.2 Maíz Illinois Julio .....  | 51 |
| <b>5. Conclusiones</b> .....   | 62 |
| <b>6. Desafíos para Argentina</b> .....  | 64 |
| <b>7. Referencias bibliográficas</b> .....                                     | 66 |
| <b>8. Apéndices</b> .....  | 68 |

## 1. Abstract

El factor climático ha producido históricamente cuantiosos efectos en la economía. Según el Instituto Meteorológico Británico, se estima que más del 80% de la actividad económica está influenciada, directa o indirectamente, por los diferentes eventos del clima<sup>1</sup>.

A raíz de ello, el hombre ha buscado a lo largo de la historia la forma de enfrentar este riesgo, dado que su existencia genera una volatilidad en los flujos de fondos de las compañías e individuos mayor a la deseada. Por este motivo, dentro de la cobertura de riesgo tradicional, como lo son los futuros, las opciones y los *swaps*, existe una categoría particular denominada derivados climáticos, los cuales operan sobre índices específicos como lo son la temperatura, las precipitaciones y la nieve, entre otros.

En este trabajo, investigo acerca de la utilidad de los derivados climáticos sobre precipitaciones para mitigar el riesgo del productor agrícola. Con este objetivo, desarrollo un modelo de valuación sobre opciones europeas (*put*), para determinar si efectivamente el uso de la cobertura reduce el desvío estándar de los flujos del productor. En particular, estudio el caso de la soja en Iowa y el maíz en Illinois, los dos estados más importantes en cuanto a producción de dichos cultivos. Luego de obtener el precio justo del derivado a partir de un modelo estadístico, realizo un *testeo* de 60 años hacia atrás para determinar si habría sido útil o no su implementación.

Un segundo objetivo de la investigación es profundizar sobre el tema del *basis risk*, es decir, determinar si la utilización de una opción valuada con información del estado en su conjunto produce efectos beneficiosos en un usuario de un condado particular dentro del estado.

Como resultado del estudio encuentro que, en los ejemplos analizados, efectivamente se verifican las dos hipótesis planteadas. En primer lugar, en ambos ejemplos concluyo que el riesgo (medido como desvío estándar) del productor del condado es menor en el caso en que se utiliza la opción en comparación a no utilizarla. En segundo lugar, afirmo que la cobertura puede ser realizada con un derivado valuado con información del estado en su conjunto y ser utilizado por el productor agropecuario de una unidad geográfica menor, cumpliendo con su objetivo de reducción de riesgo.

---

<sup>1</sup> De Paz Cobo, Sonia. *Derivados vinculados al seguro*, pág. 5.

## 2. Introducción

El clima es un factor decisivo en muchos sectores productivos cuya economía se ve relacionada con ciertas variables climáticas que no se pueden controlar y son difícilmente predecibles. Se estima que actualmente más del 75% de la actividad económica se ve afectada de manera directa o indirecta por los factores climáticos, lo cual introduce un componente de incertidumbre que, en principio, no es controlable por parte de las empresas o individuos. Entre las industrias directamente afectadas por el clima, se puede hacer mención a la energética, petrolera, agrícola, pesquera, turismo, entre otras.

El clima ha representado históricamente un riesgo en la actividad económica y, como consecuencia de ello, el ser humano se ha visto en la necesidad de desarrollar métodos de cobertura eficientes que permitan mitigar el impacto del riesgo climático. Ya desde la antigüedad, los fenicios, griegos y romanos negociaban contratos con cláusulas de opción sobre las mercancías que transportaban en sus naves. Sin embargo, ha sido en los últimos años cuando los contratos derivados han permitido a las empresas e individuos moderar las consecuencias de los riesgos climáticos<sup>2</sup>.

Los derivados climáticos surgieron como una herramienta que ofrece coberturas económicas eficientes a todos aquellos afectados por eventos climáticos altamente probables como lluvias, sequías, nieve, temperaturas demasiado altas/frías, etc. Los contratos derivados son utilizados como una herramienta de transferencia de riesgo y, consecuentemente, su objetivo es lograr que cada agente logre una combinación apropiada entre el riesgo y la rentabilidad que desea obtener con su negocio<sup>3</sup>.

Los conceptos de riesgo e incertidumbre se diferencian en que mientras el primero considera que los supuestos de una proyección se basan en probabilidades de ocurrencia que se pueden estimar, el segundo enfrenta una serie de eventos futuros a los que es imposible asignar una probabilidad. En otras palabras, existe riesgo cuando los posibles escenarios con sus resultados se conocen y existen antecedentes para estimar su distribución de probabilidades, mientras que hay incertidumbre cuando los escenarios o su distribución de frecuencia se desconocen<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> Strata, J.E. *Administración del riesgo: seguro para el sector agrícola en la Argentina*. Bolsa de comercio de Rosario, pág. 2.

<sup>3</sup> Utrera, L. *Las últimas innovaciones de la industria de derivados. Futuros exóticos*. Bolsa de comercio de Rosario. Lecturas 2004, pág. 107.

<sup>4</sup> Sapag Chain, N. *Proyectos de inversión. Formulación y evaluación*, pág. 276.

A través del uso los derivados climáticos se ha intentado aminorar este riesgo. Su aparición en el mercado es relativamente reciente y ha evolucionado constantemente desde el año 1997 hasta la actualidad, teniendo un fuerte desarrollo principalmente en el mercado estadounidense y ampliándose a lo largo de los años hacia otros mercados como los de Europa y Asia.

## 2.1 Objetivos y metodología

Un derivado es un instrumento financiero cuyo valor depende del precio de otro activo subyacente. Sin embargo, un derivado del clima deriva su valor de un subyacente que no es negociable como sí lo son los precios de los activos financieros. En este trabajo, me centro en la opción climática aplicada a la agricultura. Mi objetivo principal es desarrollar un modelo estadístico de valuación de un derivado climático sobre precipitación, para probar la hipótesis de que las opciones climáticas son un instrumento adecuado para cubrir el riesgo que genera la ausencia de agua en determinados meses del año sobre las cantidades físicas producidas, o sea, sobre el rinde a cosecha del cultivo. Un segundo objetivo de este trabajo, es *testear* si una cobertura de una unidad geográfica específica sirve para mitigar el riesgo de otra área geográfica menor, incluida dentro de la primera.

Si bien los derivados climáticos han sido estudiados en profundidad y gozan de una importante literatura, la misma no es tan extensa en el caso de las opciones sobre precipitaciones. En general, los modelos de valuación utilizados suelen basarse en el cálculo actuarial y utilizan funciones de distribución de probabilidad de las precipitaciones para obtener una aproximación al valor de la cobertura. Rescato, en este sentido, las investigaciones previamente realizadas por Banjo (2006), Castro (2009), y Henríquez Vega (2012). Estas me resultaron de gran interés y utilidad para realizar el presente trabajo.

En cuanto a la metodología utilizada, los pasos fueron los siguientes. En primer lugar, comencé por leer y profundizar sobre los textos ya existentes al respecto, de modo tal de comprender en profundidad la cuestión del riesgo climático y las posibles coberturas a utilizar. Posteriormente, habiéndome ya adentrado tanto en la historia de los derivados climáticos como en los diferentes índices existentes, decidí realizar una valuación actuarial teórica de opciones sobre precipitaciones en la principal zona productora de soja y maíz de Estados Unidos. Este trabajo de campo me permitió analizar, haciendo un *backtesting* de 60 años, las dos hipótesis de la investigación. Luego de ello, se exhiben las conclusiones obtenidas, tanto en relación al instrumento en sí mismo, como a la respuesta a las dos hipótesis planteadas.

Al final del trabajo, expongo algunas nociones acerca de la aplicabilidad de dichos derivados en Argentina, sobre todo, en lo referente a la transparencia, la disponibilidad de datos, y a los aspectos regulatorios y de mercado necesarios para la existencia de los mismos. En concreto, me centro en el aporte que pueden hacer tanto los individuos o empresas, los mercados regulados, el sector bancario y el gobierno para que estos instrumentos puedan ser utilizados en nuestro país.

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Derivados financieros

Los mercados de futuros fueron creados inicialmente para satisfacer las demandas de agricultores y comerciantes con el fin de disminuir la exposición al riesgo de volatilidad en el precio. Lo que se hizo inicialmente fue negociar contratos de futuros para pactar precios razonables para las dos partes antes de conocer si se presentaría una situación de escasez o abundancia del producto en cuestión<sup>5</sup>.

Los productores e inversores se han visto en la necesidad de cubrirse ante situaciones adversas y, en respuesta a esta necesidad, es que surge el mercado de derivados brindando herramientas que permiten mitigar riesgos que impactan en los costos y los beneficios de la empresa o los individuos. Si bien permiten el manejo de ciertos riesgos con mayor certidumbre y precisión, a la vez son utilizados con fines especulativos, lo que los convierte en instrumentos con cierto nivel de riesgo dada la volatilidad del activo subyacente.

Un contrato de derivados consiste en un instrumento financiero cuyo valor se basa en el precio de alguna variable o ítem subyacente, por ejemplo un producto básico, un activo financiero o un índice. El activo subyacente puede ser un bien físico, donde el precio de los derivados se ve afectado por las expectativas generadas acerca de la escasez a la que se sujetarán la oferta y demanda futuras; o bien un producto financiero, como por ejemplo, acciones, monedas, o tasas de interés. Desde un punto de vista teórico, en un contrato de derivado financiero, el precio futuro del activo subyacente se deriva de su precio actual (el precio *spot*) y la tasa de interés (el valor del dinero en el tiempo)<sup>6</sup>. Matemáticamente,

$$F_t = S_0 * e^{rt}$$

Es decir, el precio del futuro para la fecha “t” ( $F_t$ ) es igual al precio *spot* ( $S_0$ ) ajustado a la fecha de expiración del contrato (considerando la tasa de interés “r” y el tiempo a vencimiento “t”). De todos modos, hay que tener en cuenta que esta fórmula es teórica pero puede no cumplirse al observar los precios de mercado en la realidad.

---

<sup>5</sup> Hull, John. *Introducción a los mercados de futuros y opciones* (2002), pág. 2.

<sup>6</sup> Gray, Simon et al. *Ensayo Derivados financieros* (2003), pág. 2.

### 3.1.1 Tipos de Derivados financieros

Existen distintos tipos de derivados y la elección del instrumento dependerá del riesgo que se espera cubrir con el uso del mismo. Los distintos derivados existentes son: *forwards* y futuros, opciones y *swaps*.

- *Forwards* y futuros

Los *forwards* y futuros son contratos a través de los cuales las partes se comprometen a la compra/venta de determinados bienes o activos (subyacentes) a un precio y fecha futura establecida. Corresponde a un futuro cuando el contrato se celebra en un mercado organizado y en caso de negociarse fuera de él recibe el nombre de contrato a plazo o *forward*. El tomador de una posición está obligado a comprar o vender el activo subyacente a la fecha y precios establecidos.

Bajo estos contratos se establecen las condiciones y características de la transacción que incluyen: el activo subyacente objeto de la transacción, la cantidad y el precio a una fecha determinada futura. En este tipo de contratos, las partes adquieren una obligación sin que ello implique una contraprestación monetaria al momento de celebrarlo. Sin embargo, en los mercados organizados, las partes hacen entrega de un depósito de garantía a los fines de garantizar el buen fin de la operación<sup>7</sup>.

El valor del contrato<sup>8</sup> consistirá en la diferencia entre el valor pactado y el precio de mercado de dicho activo. Dicho valor será el que efectivamente se cobre o se pague como resultado de la operación, conocido bajo el nombre de *payoff* (retribución del derivado).

- Opciones

Las opciones ofrecen a sus propietarios el derecho, pero no la obligación, a comprar (opción de compra o *call option*) un activo determinado a un precio fijo en algún momento en el futuro. La principal diferencia entre las opciones y los activos financieros clásicos (acciones y bonos), radica en que no representan un derecho sobre el activo del emisor. Es decir, un accionista ordinario tiene derecho sobre una parte de los beneficios futuros y de los activos de la compañía, mientras que el tenedor de una opción de compra (*call*)

---

<sup>7</sup> Me refiero tanto al margen inicial, que suele ser un porcentaje del valor del contrato, como a los márgenes diarios, en caso de ser necesarios si la variación de precios contraria a la posición tomada exige la reposición de dinero.

<sup>8</sup> El valor del contrato al momento de su celebración es, por definición, igual a cero.



sólo tiene el derecho a adquirir acciones en el futuro lo que representa sólo un derecho potencial sobre los activos y beneficios de la empresa<sup>9</sup>.

Por otra parte, un accionista posee un título emitido por la compañía al haberla provisto de recursos financieros a cambio de ingresos futuros. El tenedor de una opción no tiene relación alguna con la empresa sobre cuyos títulos posee un derecho de compra o venta. Éste tiene un acuerdo con otra contraparte, el vendedor de la opción, que es plausible de una posible adquisición o venta en el futuro de los títulos a un precio determinado<sup>10</sup>.

Las opciones pueden llegar a no tener ningún valor si el precio del subyacente se ha movido en dirección contraria a las expectativas del tenedor en la fecha en la que expira la opción. Es decir, existe un valor intrínseco y un valor tiempo de la opción. Las opciones pueden ser de dos tipos, de compra y de venta (*put*). La fecha fijada como límite para ejercer el derecho es conocida como fecha de expiración o vencimiento (*expiration date*) y el precio al que se puede ejercer la opción es el precio de ejercicio (*strike*). Las opciones se pueden dividir en dos, dependiendo de su vencimiento, aquellas que sólo se pueden ejercer el día de su vencimiento reciben el nombre de europeas, pero si se pueden ejercer antes reciben el nombre de americanas<sup>11</sup>.

En este tipo de contratos, el ejercicio de la opción dependerá de la conveniencia de la compra o venta siempre que el valor pactado del activo a adquirir o vender sea más conveniente que a su precio de mercado. A continuación, en el Cuadro 1, se puede observar cómo afectan ciertas variables al precio de las opciones.

CUADRO 1

| Variables / Parámetros del valor de una opción financiera        | Europeas          |                   | Americanas      |                |
|--|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|
|  | Precio del Call   | Precio del Put    | Precio del Call | Precio del Put |
| Precio corriente de la acción ( <i>Spot</i> )                    | Sube (+)          | Baja (-)          | Sube (+)        | Baja (-)       |
| Precio de ejercicio ( <i>Strike</i> )                            | Baja (-)          | Sube (+)          | Baja (-)        | Sube (+)       |
| Plazo hasta el vencimiento                                       | Indeterminado (?) | Indeterminado (?) | Sube (+)        | Sube (+)       |
| Volatilidad del retorno del precio de la acción ( <i>Sigma</i> ) | Sube (+)          | Sube (+)          | Sube (+)        | Sube (+)       |
| Tasa de intereses libre de riesgo                                | Sube (+)          | Baja (-)          | Sube (+)        | Baja (-)       |

Fuente: Donzelli, Maximiliano. *Financiamiento de empresas argentinas 2015-2016 en los mercados internacionales ¿es una opción los bonos callable?*, pág. 10.

<sup>9</sup> Mascareñas, Juan. *Opciones I: Introducción*, pág. 1.

<sup>10</sup> Mascareñas, Juan. Op. Cit, pág. 1.

<sup>11</sup> Mascareñas, Juan. Op. Cit, pág. 4.

- *Swaps*

Un *swap* o permuta financiera es un contrato a través del cual dos partes se comprometen a intercambiar cantidades de dinero en fechas futuras. Se puede considerar un *swap* a todo intercambio futuro de bienes o servicios (entre ellos de dinero) referenciado a cualquier variable observable. Usualmente se referencian a tasas de interés, lo que les da el nombre de *Interest Rate Swap* (IRS).

### 3.2 Riesgo climático

Habiendo hecho mención a los derivados financieros en general, nos adentramos ahora en el riesgo climático, el cual genera la existencia de un mercado de derivados financieros que tienen a algún índice climático como subyacente. El clima representa una dificultad en el cálculo de las estimaciones financieras y económicas y su impacto afecta directamente en los flujos de fondos, ingresos y costos de una empresa. Consideramos como riesgo climático principalmente a aquellos eventos relacionados con el clima que no necesariamente implican fenómenos catastróficos sino menos dramáticos y más habituales, pero no por ello menos perjudiciales para la economía de la empresa o del individuo.

Teniendo en cuenta su impacto económico, es de vital importancia aplicar ciertas herramientas que sirvan de cobertura sobre este riesgo, las cuales proporcionan una serie de ventajas tanto económicas, como de reputación y estratégicas, entre las que podemos mencionar:

- Permiten prevenir pérdidas y proteger beneficios
- Implican una estrategia responsable de control de riesgos
- Protegen los intereses de ciertos usuarios como accionistas, inversores o empleados
- Permiten obtener ventajas respecto a otras entidades de similar actividad económica que no estén cubiertas ante estos eventos
- Generan una imagen positiva frente al mercado, implicando una mayor posibilidad de entrada de capital y crédito

### 3.3 Historia de los Derivados Climáticos

Como se mencionó precedentemente, ya desde la antigüedad existe evidencia del uso de coberturas ante el riesgo del clima. Sin embargo, el primer derivado climático que se realizó a través de un contrato *over the counter* (OTC) fue en 1996 entre *Enron* y *Florida Power & Light*, diseñado por *Koch Industries*. Fue estructurado para el invierno de 1997 en Milwaukee, Wisconsin. Este contrato consistía en un *swap* basado en la variable temperatura sobre un índice *Heating Degree Days* (HDD)<sup>12</sup>.

A partir de esta transacción, los derivados climáticos se han ido desarrollando fuertemente sobre todo en el mercado de Estados Unidos, creciendo de manera exponencial. Su mayor auge fue alrededor del año 2007, previo a la crisis financiera. En el año 2001, según *Price Waterhouse Coopers*, el mercado de derivados climáticos alcanzaba aproximadamente 4.000 contratos negociados en el año, que representaban alrededor de 4.200 millones de dólares. Según el *Weather Risk Management Association* (WRMA)<sup>13</sup>, los eventos de “El Niño”<sup>14</sup> marcaron los primeros dos años de estos contratos, particularmente en el caso de las empresas gasíferas, que necesitaban proteger sus ingresos de las fluctuaciones en el consumo de gas debido a los inviernos húmedos. Las empresas de energía fueron muy activas en el *trading* de este tipo de derivados hasta la crisis del sector energético del año 2001-2002. Ese lugar preponderante fue reemplazado por aseguradoras, bancos y *hedge funds*.

A partir del año 2003, se lanzaron los contratos HDD mensuales y estacionales en algunas ciudades de Europa, mientras que surgían nuevos contratos en Estados Unidos sobre el índice de precipitación de nieve, con alcance a nuevas ciudades estadounidenses. Durante el año 2004, el mercado se masificó llegando a Canadá con derivados CDD, HDD y *Cumulative Average Temperature* (CAT). Las innovaciones continuaron en 2007 con la adición de contratos de Temperatura Promedio Semanal con el fin de capturar las variaciones de corto plazo durante la semana laboral, es decir, de lunes a viernes.

Cuando el contrato se estructura entre partes privadas (OTC) se establecen las características de acuerdo a las necesidades particulares. Inicialmente, las transacciones por derivados climáticos se desarrollaban OTC hasta que la *Chicago Mercantile*

---

<sup>12</sup> Más adelante se exponen los diferentes índices climáticos sobre los cuales se puede estructurar el derivado, dentro de los cuales se encuentra el HDD.

<sup>13</sup> El WRMA es una asociación creada en 1999 para el manejo del riesgo climático. Busca generar conciencia y promover el crecimiento del mercado de riesgo climático. Para más información visitar [www.wrma.org](http://www.wrma.org)

<sup>14</sup> El Niño es un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico tropical, afectando directamente a la distribución de las precipitaciones en las zonas tropicales y puede tener una fuerte influencia sobre el clima en las otras partes del mundo.

*Exchange (CME Group)*<sup>15</sup> estandarizó este tipo de instrumentos, permitiendo así su regulación, estableciendo condiciones y características y, por consiguiente, facilitando su masificación.

El CME surge por una necesidad, debido a ciertos incumplimientos de estos contratos, teniendo como principal finalidad la de establecer reglas y pautas en las negociaciones de este tipo de instrumentos, y actuar como agente intermediario entre compradores y vendedores, lo que representa que se opere a través de un mercado regulado y no entre las partes entre sí. CME es la bolsa precursora a nivel mundial sobre los derivados climáticos y la que opera el mayor número de transacciones de futuros climáticos. La misma comenzó a operar en septiembre de 2009 y, en sus inicios, los contratos de futuros que ofrecía se basaban en los índices de días de calentamiento (HDD) y días de enfriamiento (*cooling degree days* o CDD) para las principales ciudades de Estados Unidos. Estos utilizan como variable la temperatura promedio diaria evidenciada en ciertas ciudades. A partir del año 2011, CME comenzó a ofrecer derivados sobre la variable precipitaciones, nieve y huracanes<sup>16</sup>. En el año 2010, la CME ofrecía derivados climáticos en 24 ciudades de Estados Unidos, 11 en Europa, 6 en Canadá, 3 en Australia y 3 en Japón.

Tal como se ha mencionado anteriormente, la industria que ha operado en mayor medida con este tipo de instrumentos financieros fue el sector energético, dada la incidencia de las precipitaciones en las generadoras hidroeléctricas y la relación entre la temperatura y la demanda de calefacción por parte de los usuarios. Según un estudio realizado por el WRMA, las industrias más representativas en el uso de derivados climáticos, además de la energética, son la construcción y luego la agricultura.

De acuerdo a estudios realizados por el Instituto Meteorológico Británico, el clima incide directa e indirectamente en más del 80% de la actividad empresarial a nivel mundial, lo que en cierto modo explica el crecimiento exponencial de las transacciones bajo contratos basados en derivados climáticos.

A nivel internacional, aún se continúa operando bajo la metodología OTC o bien a través de mercados regulados y organizados, principalmente el CME y el *London International Financial Futures and Options Exchange (LIFFE)*<sup>17</sup>. Los mercados financieros donde se

---

<sup>15</sup> El CME Group es un mercado organizado que reúne a compradores y vendedores en la plataforma de negociación electrónica CME Globex y en los pisos de operaciones de Chicago y Nueva York. Para más información visitar [www.cmegroup.com](http://www.cmegroup.com)

<sup>16</sup> Estos fueron des-listados en octubre de 2014.

<sup>17</sup> El LIFFE es un mercado de futuros basado en Londres. Actualmente LIFFE es parte de *Intercontinental Exchange Group*.

han desarrollado estos instrumentos con mayor fuerza son Estados Unidos, Europa, Japón, Australia y Canadá, debido a la estacionalidad que presenta el clima a lo largo del año, estableciéndose dos períodos de tiempo en que se clasifican estos contratos: días de calefacción, período comprendido entre noviembre y marzo, y días de aire acondicionado, período comprendido entre mayo y septiembre.

Más allá del auge experimentado en sus inicios, a partir del año 2007, como consecuencia de la crisis financiera y ciertos errores cometidos en el uso de estos derivados, se ha generado cierta subestimación en dichos instrumentos financieros, resultando en una importante caída en las transacciones basadas en derivados climáticos.

Actualmente, la CME opera con este tipo de derivados en 10 diferentes ciudades a nivel mundial, 8 de ellas corresponden a ciudades de Estados Unidos y 2 de Europa<sup>18</sup>:

- New York
- Chicago
- Atlanta
- Cincinnati
- Dallas
- Sacramento
- Las Vegas
- Minneapolis
- Londres
- Ámsterdam

#### Weather Products



### 3.4 Mercado de Derivados Climáticos

El clima ha sido parte de la historia del hombre y de la evolución del planeta desde sus inicios. Inclusive en la sociedad moderna, en donde los adelantos tecnológicos son una constante, el clima sigue jugando un papel fundamental. Influye permanentemente en

<sup>18</sup> Ver <http://www.cmegroup.com/trading/weather/>

nuestras vidas, en las decisiones que tomamos e inclusive en la rentabilidad de las empresas<sup>19</sup>.

Como consecuencia de ello surge el mercado de los derivados climáticos, los cuales son instrumentos financieros en los que, a diferencia de los derivados tradicionales, la variable sobre la cual se basa el valor del contrato es un índice climático que se pueda medir objetivamente (como la temperatura promedio, milímetros de lluvia caída, velocidad del viento, etc.) en un determinado momento y lugar específico.

Los derivados climáticos funcionan como los derivados tradicionales: hay un mercado primario en donde se transan las coberturas y un mercado secundario que aporta liquidez. El mercado primario es el punto de encuentro de los usuarios finales, es decir, los empresarios o individuos cuyas actividades están expuestas a riesgos climáticos y que buscan vendedores (bancos, aseguradoras, reaseguradoras) dispuestos a asumir estos riesgos<sup>20</sup>.

En el mercado primario, los vendedores ofrecen contratos estructurados para dar respuesta a las necesidades específicas de cada cliente. En el mercado secundario, los vendedores *tradean* contratos estandarizados que les permiten manejar el riesgo de sus portafolios. En el caso de los derivados climáticos, podemos caracterizar al mercado primario como el OTC y el mercado secundario como el mercado regulado. En ambos casos, las variables climáticas de las cuales se desprenden los índices subyacentes son medidas por una institución neutral y de confianza (generalmente los institutos meteorológicos de los países), por lo tanto el riesgo de una disputa relacionada con la veracidad de los datos y manipulación de los mismos es muy baja.

En el mercado de derivados climáticos participan diferentes actores, cada uno de ellos tiene una posición diferente con respecto al riesgo climático. Pueden actuar como agentes que verdaderamente se cubren o como especuladores. Los primeros buscan, a través de estos instrumentos, suavizar los flujos de caja y disminuir el riesgo al que están expuestos; los segundos buscan oportunidades del mercado para sacar provecho de ellas sin incurrir en riesgos considerables. Todos ellos son importantes para el adecuado funcionamiento del mercado. La ausencia de alguno traería problemas de iliquidez y probablemente falta de transparencia en el proceso de formación de precios de los instrumentos.

---

<sup>19</sup> Cruz, Juan Sergio y Llinás, Andrés. *Modelo Analítico de derivados de clima para eventos específicos de riesgo en la Agricultura en Colombia*.

<sup>20</sup> Finas, B. *The transfer of weather risk faced with the challenges of the future*.

Los usuarios finales comprenden a las organizaciones privadas y públicas pertenecientes a todos los sectores económicos que de una u otra forma se ven expuestos a riesgos climáticos. Empresas de servicios públicos, generadores y comercializadores de energía, productores agrícolas, empresarios del mundo del entretenimiento, el sector del turismo, entre otros, hacen parte de la amplia gama de posibles usuarios finales de este tipo de contratos. En los mercados desarrollados hay una gran variedad de proveedores de derivados climáticos: compañías energéticas, aseguradoras y reaseguradoras, así como bancos y fondos de inversión hacen parte de los participantes de este segmento del negocio. Todos aquellos agentes con capacidad para administrar y asumir riesgos a cambio de una rentabilidad determinada estarán interesados en este tipo de instrumentos, además de utilizarlos como una forma de diversificar su portafolio con activos financieros con nula o baja correlación con el mercado<sup>21</sup>.

El objetivo principal del derivado climático apunta a ser una herramienta que sirva de cobertura frente a ciertos eventos meteorológicos con una alta probabilidad de ocurrencia y que afectan las utilidades, costos y flujos de fondos de una empresa.

La variable principal a utilizar no va a estar sujeta a un valor monetario en sí misma, por lo que debe tenerse en cuenta que tiene que existir una medición objetiva de la variable sobre la que se estructura el contrato. Para ello, es necesario que el derivado climático sea definido de acuerdo a los siguientes atributos:

- Tipo de contrato (*call, put, call spread, swap, collars*)
- Vigencia del contrato con fecha de inicio y finalización
- Especificación de la estación meteorológica que se considerará como referencia para la medición del índice
- Una variable climática que pueda ser medida en la estación meteorológica establecida
- Índice climático que permita definir a la variable climática aplicable durante el período de duración del contrato
- Una función de pagos, la cual convierte el índice elegido en los flujos de dinero establecidos en el contrato
- Una posible prima pagada por el comprador al vendedor al inicio del contrato

---

<sup>21</sup> Finas, B. Op. Cit. (2012).

### 3.4.1 Tipos de contratos de Derivados Climáticos

El tipo de contrato que se defina va a depender de cual sea el objeto de la cobertura y se basará en la relación existente entre el *payoff* y el valor del índice climático. Los contratos básicos que podemos mencionar junto con sus funciones de pago se expresan a continuación:

- $Call = Max (I_t - K; 0) * h$
- $Put = Max (K - I_t; 0) * h$
- $Swap = k (I_t - K)$

Donde “**I**” es el valor del índice subyacente en el momento de expiración del contrato “**t**”, “**K**” es el *strike* o precio del ejercicio, “**h**” es el *tick* y “**k**” la cantidad de *swaps*. El *tick* es el factor que convierte un valor no monetario como lo es el índice climático, en un valor monetario. En general, con la finalidad de generar liquidez, en los mercados organizados suelen otorgar un valor pequeño a “**h**” de manera tal que los distintos usuarios puedan ajustar su posición a su riesgo y este ajuste se haga con la mayor cantidad de instrumentos posibles.

El *call* tiene como finalidad la de cubrir a sus tenedores frente a excesos climáticos (por ejemplo, altos niveles de precipitaciones). Implica una protección frente a subas en el nivel de índice y permite capitalizar cualquier movimiento del índice al alza. Suele ser utilizado en aquellas industrias cuyas ventas están expuestas al riesgo climático.

En el caso del *put*, la cobertura puede entenderse como una forma que los tenedores adoptan para cubrirse frente a déficits climáticos (por ejemplo, insuficientes precipitaciones). Este tipo de contrato, de forma contraria a los *calls*, otorga protección frente a bajas en el nivel del índice y permiten capitalizar cualquier movimiento del índice a la baja.

La combinación de *calls* y *puts* permite crear estrategias más complejas, como por ejemplo los *collars*. Este tipo de contratos son muy utilizados en Estados Unidos como una estrategia de las empresas proveedoras de energía y consiste en la compra de un *put* con un precio de ejercicio bajo (que actúa como un límite inferior) y la venta de un *call* con un precio de ejercicio alto (que actúa como un límite superior). Dado que las ventas de estas empresas están expuestas al riesgo climático, la utilización de un *collar* de



opciones puede establecer un rango (determinado por los límites del *put* y el *call*) dentro del cual no efectuar ni recibir pagos<sup>22</sup>.

En el caso del tenedor de un *swap*, el mismo está obligado a efectuar un pago a la contraparte si el valor del índice climático es inferior al definido como *strike*. No así en el caso de un *put* o *call*, donde el tenedor del mismo tiene el derecho, pero no la obligación, de ejercer al vencimiento.

### 3.4.2 Variables e índices climáticos

Existe una amplia variedad de variables climáticas, entre las cuales podemos mencionar la temperatura, los niveles de lluvia o nieve caída, la velocidad y dirección del viento, los índices de humedad ambiental, cantidad de horas de sol, entre otras.

Las variables más utilizadas en los contratos de derivados climáticos corresponden a la temperatura de acuerdo a los valores mínimos o máximos diarios o bien un valor promedio diario. En segundo lugar, podemos encontrar dentro de los derivados climáticos el uso de la variable de las precipitaciones, siendo de gran utilidad principalmente en la industria agrícola y la generación de energía, cuya actividad económica se ve directamente relacionada con este evento climático.

#### 3.4.2.1 Índices basados en la temperatura

##### 3.4.2.1.1 Índices días de grado (*Degree days*)

Este índice es uno de los más estudiados y utilizados en los contratos de derivados climáticos de temperatura y fue creado por la industria energética como una necesidad de correlacionar la demanda de consumo de gas por calefacción con la demanda energética por aire acondicionado. Existen dos tipos de índices días de grado:

- HDD: *Heating Degree days*, días frescos o días de calefacción
- CDD: *Cooling Degree days*, días cálidos o días de aire acondicionado

---

<sup>22</sup> Hernández Arango, José Miguel. *Contratos financieros derivados del clima como estrategia de cobertura en Colombia. Aplicación a una central de generación hidroeléctrica.*

El cálculo de los HDD o CDD está basado en la temperatura diaria promedio que se define como:

$$T_i = \frac{T_i^{MAX} + T_i^{MIN}}{2}$$

Donde  $T_i$  es la temperatura promedio en el día  $i$ ,  $T_i^{MAX}$  es la temperatura máxima en el día  $i$  y  $T_i^{MIN}$  es la temperatura mínima en el día  $i$ .

En base a este cálculo, se determinan los diferenciales para los días dentro del período comprendido en el contrato, como diferencias entre una temperatura definida a priori, o una temperatura base (normalmente 18°C o 65°F se utilizan como medida estándar), y la temperatura diaria promedio ( $T_i$ ).

Si la temperatura media está por sobre la temperatura base, la diferencia se denomina CDD, en caso contrario se denomina HDD.

$$CDD = \sum_i (T_i - 18^\circ C) \quad \forall T_i > 18^\circ C$$

$$HDD = \sum_i (18^\circ C - T_i) \quad \forall T_i < 18^\circ C$$

Estos índices intentan mostrar la variación promedio de la temperatura durante un período determinado. El índice HDD mide la temperatura promedio de la mitad del año que se considera como frío (invierno), mientras que la otra mitad del año donde se considera cálida (verano) está medido por el índice CDD. Por ende, cuanto mayor el valor de CDD, mayor será la necesidad de energía para refrigeración, mientras que cuanto mayor el valor de HDD, mayor la necesidad de gas para calefacción. En general, se utilizan contratos vinculados a CDD durante el verano y a HDD en el invierno.

#### 3.4.2.1.2 Índices de temperatura media promedio

Estos índices sirven para determinar el promedio de las temperaturas medias diarias durante la vigencia del contrato. Fueron diseñados como una medida de la variabilidad de la temperatura, muy utilizado principalmente en la industria de la generación de energía y es principalmente utilizado en Japón. Se define como:

$$\bar{T} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} T_i$$

Donde  $T$  es la temperatura media promedio,  $T_i$  es la temperatura promedio en el día  $i$ ,  $N_d$  es el número de días que dura el período sobre el cual se calcula el índice.

#### 3.4.2.1.3 Índice de temperatura promedio acumulada (CAT)

Este índice se define como la suma de las temperaturas promedio diarias sobre el período de duración del contrato. Este tipo de índice es usualmente utilizado en el verano europeo. Se define matemáticamente de la siguiente manera:

$$x = \sum_{i=1}^{N_d} T_i$$

Donde  $T_i$  es la temperatura promedio en el día  $i$  y  $N_d$  es el número de días que dura el período sobre el cual se calcula el índice.

#### 3.4.2.1.4 Índices de eventos

También conocidos como índices de los días críticos, están definidos como el número de días dentro del contrato en que se produce el evento meteorológico determinado. Por ejemplo, un evento podría ser un exceso de precipitaciones en un período específico, un incremento de la temperatura por encima de un parámetro definido o bien el número de veces que una secuencia de días experimenta lluvias por sobre o por debajo de un parámetro definido.

#### 3.4.2.2 Índices basados en precipitaciones

#### 3.4.2.2.1 Índice de precipitaciones acumuladas

Se define como la suma de las precipitaciones diarias durante un período definido (semana, mes, temporada). Matemáticamente, se define como:

$$x = \sum_{i=1}^{N_d} P_i$$

Donde  $P_i$  es la precipitación en el día  $i$  y  $N_d$  es el número de días que dura el período sobre el cual se calcula el índice.

### 3.5 Derivados Climáticos en la Agricultura

La industria agrícola se expone a diferentes fuentes de riesgos: de producción, de clima, de mercado y de incertidumbre macroeconómica, entre otros. El clima representa una de los riesgos más difíciles de predecir y, como consecuencia de ello, de mitigar sus consecuencias. A este riesgo se lo denomina agroclimático, que se manifiesta en la probabilidad de la afectación del rendimiento o calidad de los cultivos por efecto de un fenómeno climático adverso. El mismo está compuesto por la probabilidad de ocurrencia del fenómeno climático adverso y la reducción estimada en los rendimientos por efecto del mismo.

Ello implica una fuerte correlación entre fluctuación de los volúmenes de producción de siembra y el clima y, por ende, representa una fuente de riesgo económico para el sector agrícola. En tal sentido, la industria se ha visto en la necesidad de recurrir a ciertas herramientas para el manejo del riesgo que minimicen los efectos financieros de tales fluctuaciones climáticas, entre ellas, los derivados climáticos.

Para países subdesarrollados, los derivados climáticos crean nuevas oportunidades para sobrellevar los riesgos de catástrofes o desastres y, en segunda instancia, promover nuevos productos de seguros para sectores que son altamente dependientes del clima, como es el caso de la agricultura<sup>23</sup>. Se pueden obtener derivados climáticos hechos a medida para proteger financieramente siembras dependientes del calor tales como

---

<sup>23</sup> Geysler, J.M. *Weather derivatives. Concept and application for their use in South Africa*, pág. 2.

algodón, siembras dependientes del agua tales como el trigo, entre otras. Dado que en los países subdesarrollados la actividad agrícola primaria representa una porción importante del PBI, adquiere importancia la utilización de estos instrumentos, de modo de suavizar los efectos que generan los imprevistos del clima.

La industria agrícola en los Estados Unidos ha desarrollado un sofisticado sistema para integrar clima y riesgo para incorporar información en su planificación y manejo de cultivos y para obtener cobertura. En agricultura, los contratos de futuros son comercializados ampliamente en mercados que responden a los eventos climáticos, así como otras fuerzas que actúan en la oferta y demanda del sector agrícola. Limitando el riesgo potencial tanto hacia el alza como a la baja, estos contratos proveen al productor de un aceptable margen financiero, mientras que crean también la posibilidad de que terceros participantes, que absorben el riesgo, puedan alcanzar ganancias como contraposición<sup>24</sup>. Si bien los derivados climáticos son de gran utilidad en la industria de la generación eléctrica, la aplicación de los mismos en la industria agrícola aún es limitada y compiten con los seguros agrícolas.

### 3.5.1 Ventajas, desventajas y diferencias con seguros tradicionales

Una de las principales ventajas a destacar de los derivados climáticos es que proporcionan cobertura ante eventos de bajo riesgo y de alta probabilidad, en contraposición a las coberturas de los seguros tradicionales, los cuales cubren riesgos más altos (inundación, sequía, helada, granizo) con más baja probabilidad de ocurrencia. Los derivados climáticos tienen varias características particulares. Por empezar, el pago es calculado en base a un índice climático observable. Consecuentemente, los derivados climáticos tienen una ventaja sobre el seguro tradicional para hacer coberturas contra pérdidas, y es que no es necesario tener que probar el daño ocasionado para recibir la contraprestación. La idea es que las pérdidas y ganancias que tenga la empresa o el individuo puedan estar altamente correlacionadas con la variable climática sobre la cual se basa el derivado y no que dependa directamente de las pérdidas inducidas ante el suceso de un evento climático. De este modo, se otorga transparencia al instrumento ya que no depende de la arbitrariedad de quien decide si efectivamente el daño ocurrió o no.

Los eventos climáticos que impactan en el rendimiento de los cultivos están a menudo correlacionados, creando de esta manera problemas para los seguros tradicionales, los cuales están diseñados para un abanico numerosamente amplio de pequeños productores. Los riesgos no correlacionados que generan pérdidas sistémicas provocan mayores costos de transacción al vender el servicio de aseguramiento de los cultivos. Las aseguradoras

---

<sup>24</sup> Rodríguez Tablado, Luis Ángel. *Derivados climáticos* (2012), pág. 42.

normalmente pasan esos costos a los compradores mediante el aumento de las tasas de las primas, haciendo de este modo más caro el acceso a la cobertura.

Consecuentemente, los seguros de los rendimientos de cultivos están altamente subsidiados por el gobierno en los Estados Unidos y en otros países. Aun así, las primas subsidiadas por el gobierno son insuficientes y determinan un alto costo social<sup>25</sup>.

Como desventaja, los derivados climáticos implican una reevaluación periódica de las posiciones del derivado, no siendo necesario en el caso de los seguros. Es decir, existe un componente de valuación *mark-to-market* y también de garantías iniciales y *margin call* que pueden implicar un costo adicional sobre el valor de la opción o del futuro tomado, dado que requiere la revisión y seguimiento constante por parte tanto del mercado que permite operar el seguro como del *broker*, en caso de que se opere en mercados regulados. En la actualidad están surgiendo instrumentos financieros que permiten a los aseguradores securitizar<sup>26</sup> riesgos correlacionados y eludir las limitaciones de los mercados aseguradores tradicionales. Un ejemplo interesante son los contratos de índices agrícolas, que podrían ofrecer ventajas comparadas con los seguros tradicionales de rendimiento de cultivos.

#### 3.5.1.1 Riesgo base

La mayor desventaja de los derivados climáticos radica en el riesgo base (*basis risk*), el cual refleja el hecho de que las variables climáticas subyacentes son medidas en ubicaciones específicas y pueden diferir de las manifestaciones de las mismas variables en diferentes ubicaciones. Debido a que los fenómenos climáticos, como las lluvias, tienden a estar bien ubicadas geográficamente, aún una relativamente escasa distancia entre la medida de estaciones climáticas y el campo podría resultar en discrepancias considerables entre las pérdidas ocasionadas y los pagos de los derivados<sup>27</sup>. Es decir, se podría descomponer el riesgo que asume el productor agrícola que toma cobertura en dos partes: por un lado, el riesgo específicamente agroclimático, que consiste en el efecto directo del impacto del índice subyacente sobre el cultivo en cuestión; en segundo lugar, el riesgo geográfico, que captura el hecho de que el tomador de cobertura lo haga con un contrato que no depende específicamente de la zona donde está ubicado su campo. El interés del productor estará justamente en encontrar, en la medida de las posibilidades

---

<sup>25</sup> Para profundizar sobre el tema de la cobertura en Estados Unidos, recomiendo leer acerca del *Yield Protection* en la página web <https://www.extension.iastate.edu/agdm/crops/html/a1-52.html>

<sup>26</sup> El término "securitización" hace referencia al diseño de instrumentos financieros (bonos de renta fija o variable) respaldados por flujos provenientes de activos de distinta naturaleza, como pueden ser hipotecas, contratos de arrendamiento u otros créditos.

<sup>27</sup> Vedenov, D. y Barnett, B. *Efficiency of weather derivatives as primary crop insurance*, pág. 389.

dentro de lo que se le ofrezca, aquel derivado en donde la correlación con lo sucedido en su ubicación sea lo más alta posible, de modo de minimizar el *basis risk*. Este tema será abordado en los ejemplos específicos que se tratan en la Sección 4 del trabajo.

Dicho de otro modo, aparece el riesgo base cuando la variable registrada por una estación climática particular, de la cual dependen los flujos de dinero del derivado, no es la misma que la de la ubicación de interés del que se cubre. Esto implica, en la medida en que el clima en el lugar de interés se aleje del clima registrado por la estación de referencia, que el derivado perderá efectividad y la cobertura no será la esperada.

El riesgo base se eliminaría completamente si el índice de riesgo climático utilizado en el contrato de cobertura idealmente se realizara sobre la misma localización donde el derivado sería utilizado. Sin embargo, llevar esto a la práctica es poco factible, aunque implicaría eliminar una de las principales desventajas del índice del contrato en contraposición a las ventajas como menor costo de transacciones (en relación a los seguros de cultivos tradicionales) y la posibilidad de transferir el riesgo al mercado de capitales. Es importante no perder de vista el riesgo base geográfico, ya que puede hacer perder efectividad de la cobertura hasta un punto tal que la haga inviable.

Adicionalmente, otro problema potencial con los derivados climáticos puede surgir cuando hay una pobre correlación entre la lluvia y el rendimiento de cultivos. Los derivados climáticos son útiles en la medida en que la variable subyacente sea capaz de explicar la volatilidad en la producción o en las ventas. Para ello, los investigadores y la industria de seguros están investigando contratos de índices y el desarrollo de modelos que vinculan lluvia a rendimiento. Este modelo permitiría a los productores agrícolas contar con una mayor cobertura; podrían saber el efecto de un evento climático y asegurarlo de una manera más efectiva. La modelización del impacto de las precipitaciones sobre el rinde agrícola será abordada en la Sección 4 del trabajo.

### 3.6 Métodos de valuación de Derivados Climáticos

Para la estimación del valor del derivado, como primera medida debemos establecer un precio de ejercicio o *strike*. Éste es el valor del índice que garantice que, en promedio, ninguna de las dos partes gane o pierda en el largo plazo. Una empresa emisora querrá vender un contrato a un precio ligeramente superior al *fair value* surgido de dicho *strike* para poder así generar utilidades. Ello implica, por lo tanto, determinar un precio justo más un *spread* que incluye una prima por riesgo de mantener una posición abierta sobre el contrato.

El método de valuación utilizado para llegar al precio justo apropiado va a estar sujeto a las necesidades, dependiendo del mercado existente y las condiciones del contrato a celebrar.

### 3.6.1 Actuarial pricing

Este método tiene en cuenta la evaluación de las probabilidades de todos los flujos futuros del contrato o de un portafolio de contratos. Para ello, deben determinarse algunos supuestos que consisten, en primer lugar, en que los datos sean estacionarios y considerar, como consecuencia, que los valores para los distintos años son independientes y están idénticamente distribuidos.

En este caso el problema radica en conocer cómo trabajar con estos datos, así como también determinar qué tipos de datos resultan confiables. Al utilizar técnicas actuariales hay que tener en cuenta información histórica para determinar un valor justo acorde una hipotética erogación de fondos futura.

Dentro de la valuación por el método actuarial, se puede aproximar al valor a través de dos métodos. El primero consiste en considerar los pagos que habría realizado el derivado, es decir, el *payoff*, teniendo en cuenta los datos históricos del índice climático. Este sistema se denomina *Burn analysis*. La otra forma de valuación considera el comportamiento estocástico del índice climático, asumiendo una distribución de probabilidades para el mismo.

En ambos casos, la técnica que se utiliza en las estimaciones de *payoff* es similar a la que tiene lugar en las compañías aseguradoras. Cuando se calcula la prima de un contrato de seguros, la prima surge de calcular la esperanza matemática (promedio) de las erogaciones en caso de siniestro<sup>28</sup>.

Más en detalle, para la estimación y una correcta valuación del derivado, se puede proceder de dos maneras. Una de ellas es calcular el flujo de fondos que habría correspondido a cada período según los valores que tomó históricamente el índice, para luego obtener el promedio de los pagos y traerlo a valor presente (ya que el pago, en caso de existir, se hará en un momento futuro). La otra forma consiste en, a partir de los datos históricos, derivar una función de distribución de probabilidades del índice climático en cuestión. A partir de ello, el siguiente paso es simular hipotéticos valores del índice para

---

<sup>28</sup> En algunos casos, las compañías aseguradoras también incluyen un recargo por riesgo, que representa una carga adicional para los desvíos que puedan presentarse respecto de esa media matemática.



luego realizar el mismo cálculo mencionado en el caso de trabajar con los datos históricos. Al utilizar ambos métodos, hay que ser muy consciente en la forma en que se ponderan los datos, dado que en ocasiones, es necesario realizar un ajuste para diferenciar la información histórica más reciente respecto de la anterior. El factor tiempo también influye de manera tendencial en los índices climáticos, siendo necesario en este caso incorporar estos elementos en el análisis para no obtener valores que no se corresponden con la situación actual.

Debe lograrse entonces un equilibrio entre significatividad estadística en términos de observaciones históricas pero también respecto a la capacidad para reflejar la evolución futura del índice. A fin de evitar esta última desventaja, existen modelos en donde se propone la incorporación de pronósticos respecto al comportamiento futuro del clima. Aquí, no sólo debe verificarse la veracidad de la información en la cual descansa la estimación sino la credibilidad de estos pronósticos.

La alternativa de cálculo que considera basarse en el comportamiento estocástico del índice y partir de allí inferir el flujo de fondos que generará, tiene que ser muy cuidadosamente utilizada. El inconveniente principal de esta valuación radica en ignorar los cambios que experimentó el índice climático entre el momento del cual se dispone la información y el momento para el cual se está calculando la distribución. Si bien se considera la aleatoriedad del indicador, es fundamental no ignorar la existencia de tendencia o de comportamientos cíclicos, que fácilmente pueden ser incluidos dentro del análisis.

La problemática anterior puede solucionarse de dos modos posibles. Uno de ellos es estimando la tendencia y calculando la distribución sobre los índices netos de tendencia. La otra alternativa es a partir de la definición de un proceso estocástico que modele el comportamiento del índice climático en función del tiempo. Considerando la información disponible, no se estudia a la variable independientemente del tiempo sino que se considera que la función de distribución de probabilidades de la variable para cada uno de los periodos estudiados tiene un componente determinístico (tendencia) y otro componente estocástico.

En este sentido, resulta interesante la utilización de modelos que incorporan, además del comportamiento estocástico del índice, un componente cíclico o tendencial. Es el caso de los *mean-reverting models*, los cuales asumen que la variable tiene un comportamiento de reversión a la media en la medida que se aleja de ella. Es decir, no puede distanciarse por un período largo del tiempo de su valor esperado. En función de las características mencionadas, es usual considerar como válido para la modelización de datos el proceso

de *Ornstein-Uhlenbeck*<sup>29</sup>, al cual se le adiciona un factor para la reversión a la media para otorgarle mayor credibilidad de estos pronósticos.

### 3.6.2 Market based o arbitrage pricing

Este método consiste en mirar los precios de mercado y determinar el precio de no-arbitraje para el derivado. Se basa en la idea de que los retornos de un activo pueden ser predecidos utilizando una combinación lineal entre éste y determinadas variables macroeconómicas. Para su correcta utilización es necesario que exista un mercado de derivados climáticos observable y que opere con liquidez en un mercado regulado.

### 3.6.3 Black-Scholes

Para la valuación de un derivado financiero tradicional, usualmente se utiliza el método *Black-Scholes*. Sin embargo, su fórmula no es aplicable en materia de contratos por derivados climáticos. La principal causa radica en que el activo subyacente responde a una variable climática que no se negocia en el mercado, no pudiendo utilizarse la fórmula de *Black-Scholes* ya que ésta supone replicar el *payoff* del derivado actuando dentro del mercado.

Dado que el índice climático no es un producto transable en el mercado, resulta una dificultad aplicar este método, ya que las variables meteorológicas no cumplen los supuestos que hacen a este modelo, los cuales afirman que<sup>30</sup>:

- Los precios de los subyacentes deben seguir un proceso de movimiento *browniano* geométrico
- Es posible tomar posiciones cortas en el subyacente
- No existen oportunidades de arbitraje
- No existen costos de transacción
- Es posible tomar prestado y prestar dinero una tasa de interés libre de riesgo

---

<sup>29</sup> Uhlenbeck, G. y Ornstein, L. *On the theory of Brownian motion*, 1930, pág.823–841

<sup>30</sup> Henríquez Vega, Patricio. *Derivados Climáticos: Valorización de opciones sobre precipitaciones*, 2012, pág 16.

Pino, Rendoll y Torres (2009), justifican la no utilización del método *Black-Scholes* bajo el siguiente argumento: “El clima no sigue un *random walk*<sup>31</sup>. A diferencia de un activo subyacente tradicional, las variables como la temperatura tienden a permanecer en bandas relativamente estrechas (...) El clima no es aleatorio, dada su naturaleza, es previsible en el corto plazo y azaroso (dentro de los promedios históricos) en el largo plazo (...) Las variables como la temperatura o la lluvia no son transables y no están sujetas a factores de la economía, no cumpliendo las condiciones básicas de *Black-Scholes*”.

### 3.6.4 Modelos de valuación de Derivados Climáticos sobre precipitaciones

Con respecto a los modelos de valoración de derivados climáticos desarrollados sobre precipitaciones, estos provienen de dos fuentes dentro de las mencionadas anteriormente: modelos meteorológicos y modelos estadísticos.

Los meteorológicos incluyen el modelamiento de las dinámicas atmosféricas y tienden a ser muy precisos en un horizonte de hasta 10 días pero, por lo general, no tienen un buen comportamiento a largo plazo, haciéndolos un tanto restrictivos en su uso en el mercado de derivados climáticos, ya que implican una cobertura con períodos de tiempo más prolongados.

Por otro lado, existen los modelos estadísticos, que han tenido una mayor relevancia en la valoración de los derivados climáticos. Los mismos consisten en la predicción de precipitaciones incluyendo una variedad de aproximaciones en base a funciones distribución que representen la variable. Al momento de plantear un modelo de predicción de variables meteorológicas, un factor relevante a tener en cuenta consiste en la frecuencia con la que se quiere predecir (semanal, diario, mensual, temporadas, etc).

Resulta sumamente interesante la revisión que realiza Henríquez Vega<sup>32</sup> acerca de la literatura existente acerca de los diferentes modelos de predicción existentes. Esta información es replicada a continuación.

Los modelos de predicción diaria presentan una complicación cuando existe gran cantidad de días en que las precipitaciones son iguales a cero, lo que disminuye la media. Una solución a esta complicación es separar la información histórica entre datos mayores a cero y observaciones donde la variable sea cero. Para resolver esto, Cao, Li y Wei (2004)

---

<sup>31</sup> En estadística, se define un *random walk* como la formalización de la trayectoria que resulta de hacer sucesivos pasos aleatorios.

<sup>32</sup> Henríquez Vega, Op. Cit., pág 21.

presentaron un análisis basado en cadenas de Markov con una determinada probabilidad de transición, mediante la cual se determina si, en un día en particular, llueve o no llueve, en caso positivo se utiliza el análisis antes descrito sobre densidades de distribución. Finalmente el modelo de valorización de estos autores propone 10.000 simulaciones de Montecarlo de la variable y luego calcula el precio de la opción como la suma de los flujos esperados, descontados a una tasa libre de riesgo.

“Otros modelos propuestos desde la estadística, presentan regresiones para observar la influencia de otras variables meteorológicas en las precipitaciones. Banjo (2006) propone realizar una regresión basada en mínimos cuadrados ordinarios donde la variable dependiente son las precipitaciones y como variables independientes considera: velocidad del viento, temperatura, humedad ambiente, temperatura del aire, presión y horas de luz. Los resultados muestran un ajuste muy pobre, explicando 29,7% de la varianza de las precipitaciones. Debido a los bajos ajustes obtenidos, este autor descartó la realización de un modelo basado en regresiones y volvió a la idea propuesta anteriormente de una modelación no paramétrica, utilizando funciones de densidad *kernel*<sup>33</sup>. En su trabajo, Banjo, propone un modelo para predecir precipitaciones acumuladas semanales, de esta manera predijo las precipitaciones para cada semana del año, los mejores resultados fueron obtenidos para los períodos de más lluvia. Finalmente este autor hace algunas recomendaciones sobre cómo deberían ser futuros trabajos y dentro de estos nombra el uso de mezclas de modelos para describir la distribución de las precipitaciones, separadas entre valores altos y bajos de precipitaciones”<sup>34</sup>.

---

<sup>33</sup> Ver Miñarro, Antonio. *Estimación no paramétrica de la función de densidad*. 1998, pág 11.

<sup>34</sup> Henríquez Vega, Op. Cit., pág 22.

#### 4. Modelo de valuación de la opción climática

El principal aporte que intento hacer con este trabajo son las conclusiones que se obtendrán posteriormente acerca de la utilidad de los derivados climáticos para mitigar el riesgo del productor agropecuario ante la falta de precipitaciones en un determinado mes del año. Asimismo, busco responder al interrogante sobre si dicha cobertura puede ser realizada con una opción que introduce un riesgo base geográfico. Con el objetivo de dar respuesta a ambas hipótesis, introduzco a continuación un modelo de valuación de la opción sobre precipitaciones mensuales acumuladas.

Si bien los derivados climáticos pueden tener como subyacente diferentes tipos de índices, como he desarrollado más arriba, elijo realizarlo sobre lluvias por dos motivos. En primer lugar, porque la literatura actual es mucho más escasa en lo que se refiere a este índice subyacente, con lo cual considero que el aporte es más significativo en este aspecto. En segundo lugar, porque las opciones sobre temperatura (que es la otra alternativa más utilizada) además de estar más desarrolladas en cuanto a su estudio teórico, gozan actualmente de un mercado organizado donde se transan diariamente, con lo cual el precio ya está determinado por el mercado<sup>35</sup>. Considero que aporta más al debate introducir nuevas ideas acerca de un índice mucho menos desarrollado como lo es aquel sobre precipitaciones<sup>36</sup> y, asimismo, mostrar empíricamente el método de valuación que utilizo para arribar a las conclusiones.

Tal como ya he comentado<sup>37</sup>, esta clase de derivados no puede ser *priceada* mediante el modelo tradicional de *Black & Scholes*, dado que el subyacente climático no es transable en el mercado y, por ello, no tiene un precio conocido y transparente.

Utilizo, por lo tanto, otro tipo de valuación que consiste en el *pricing* actuarial. Dentro de la aproximación al valor a través de esta metodología, existen principalmente dos maneras de hacerlo. En mis ejemplos, valúo opciones sobre precipitaciones mensuales acumuladas. Las mismas serán opciones (*put*) europeas, es decir, que no pueden ser ejercidas por el tomador antes del vencimiento establecido en el contrato.

---

<sup>35</sup> El CME Group, por ejemplo, opera diariamente los HDD y CDD, de acuerdo a la época del año.

<sup>36</sup> Milímetros (mm) de espesor de la lámina de agua que se forma sobre una superficie plana.

<sup>37</sup> Ver Sección 3.6.3.

Una primera manera de hallar el *fair value*<sup>38</sup> de la opción a partir del cálculo actuarial es el *burn analysis*, el cual calcula en base a la información histórica los pagos que habría realizado dicha opción (en relación a un determinado *strike price*) considerando las precipitaciones históricas reales comparadas con el *strike*. El precio se obtiene como consecuencia de calcular la esperanza matemática de los hipotéticos pagos descontados a una tasa de interés libre de riesgo<sup>39</sup>. Cabe recordar que, si bien la variable precipitación acumulada no tiene un valor monetario, el pago del derivado puede ser convertido con este fin a través de multiplicarlo por un *tick*, el cual lo traduce primero a las unidades de la producción (ton/ha) y al multiplicar ese resultado por el precio a cosecha del cultivo<sup>40</sup> (USD/ton) se llega a un valor monetario de la protección (USD/ha)<sup>41</sup>. Una de las críticas o deficiencias de esta valuación es que infiere el valor a partir de una muestra muy acotada de datos históricos, por lo tanto, la predicción es débil cuando se trata de valores extremos de precipitación acumulada, ya sean muy altos o muy bajos<sup>42</sup>.

En mi ejemplo, realizo una modificación a la manera de cálculo arriba mencionada. Esta segunda manera de obtener el *fair value*, dentro del *pricing* actuarial, consiste en realizar una simulación de Montecarlo que supone una distribución probabilística específica para las precipitaciones acumuladas del período que se está valuando.

La simulación de Montecarlo requiere el cumplimiento del supuesto de que los valores de la variable exógena sean independientes para cada año. En este caso, los valores históricos de cada mes dependen de factores climáticos que oscilan entre tres y siete días, por lo cual las precipitaciones acumuladas por mes pueden ser consideradas independientes del valor adquirido en otro año.

#### 4.1 Función de producción

El modelo que utilizo se centra en la producción agrícola, y considera como variable endógena al rinde anual al momento de cosecha, mientras que las variables exógenas son la precipitación mensual acumulada e incorporo el avance tecnológico, dado que éste

---

<sup>38</sup> Es importante aclarar que, al ser negociado entre partes, comúnmente conocido como “*over-the-counter*”, al *fair value* se le puede adicionar un *spread* en el precio, que surge básicamente de los costos del emisor de la opción por ofrecer el producto.

<sup>39</sup> La razón por la que se debe descontar el flujo de pagos de la opción es porque se está valuando un pago que se realizará a futuro, al momento de expiración del derivado.

<sup>40</sup> El precio a cosecha a considerar es el del contrato de diciembre para el maíz y el de noviembre en el caso de la soja en el hemisferio norte. Ambos son negociados por el CME Group.

<sup>41</sup> No consideraré en el análisis el “riesgo precio”, es decir, el derivado es valuado con un precio futuro que coincide con el *spot* a cosecha. En este análisis tampoco existe el riesgo cambiario, pero debería ser incorporado si se valuara en un contexto de volatilidad de tipo de cambio siempre que la cobertura sea tomada en moneda extranjera.

<sup>42</sup> Ver Henríquez Vega, Op. Cit., pág. 24.

genera mejoras en el rinde anual<sup>43</sup>. En este caso, con el objetivo de cuantificar los efectos de la lluvia sobre el rinde agrícola, considero fijos (*ceteris paribus*) los tradicionales factores de producción como son el trabajo y el capital, asumiendo que la lluvia es una fuente de shocks exógenos sobre la oferta. Por lo tanto, la función de producción que enfrenta el productor agrícola es:

$$Y_t = B_0 + B_1 * t + B_2 * R_{it}$$

Interpretemos ahora la función. La variable “ $Y_t$ ” representa el rinde anual de la cosecha,  $B_0$  es una constante (indica que cierto nivel de producción no puede ser explicado ni por la precipitación ni por el avance tecnológico<sup>44</sup>),  $B_1 * t$  es la tendencia determinística que incorpora la mejora tecnológica,  $R_{it}$  es la precipitación mensual (mes “ $i$ ”) acumulada en el año “ $t$ ”; y  $B_2$  es la elasticidad o productividad marginal de la precipitación. En otras palabras, el coeficiente  $B_2$  indica la variación porcentual del rinde en el año “ $t$ ” ante una variación del 1% en la precipitación acumulada del mes “ $i$ ”<sup>45</sup>. Si bien se desprende de la función de producción, queda claro entonces que las precipitaciones de cada mes del año tendrán un impacto diferente (capturado por  $B_2$ ) en el rinde final al momento de cosecha.

En este punto es necesario aclarar que estoy suponiendo una relación lineal (creciente) entre el rinde y la precipitación mensual acumulada. En realidad, tal como sugieren Irwin y Tannura<sup>46</sup>, esta relación no es estrictamente lineal sino cuadrática, dado que, superado un umbral de precipitaciones mensuales, el efecto sobre la producción comienza a ser negativo por el exceso de agua. A los efectos de este trabajo, y debido a que mi interés se centra en realizar una valuación del derivado climático ante efectos beneficiosos de la lluvia, continuaré asumiendo por simplicidad la relación lineal.

Por lo tanto, en el ejemplo, la utilización de una cobertura de riesgo de producción debido a escasez de lluvias tendrá sentido si  $B_2$  es mayor a cero, ya que si fuera igual a cero significaría que la precipitación mensual no tiene efecto sobre el rinde final en cosecha y si fuera menor a cero (teniendo en consideración lo recientemente explicado), significaría que menor cantidad de lluvia genera un efecto positivo para el rinde.

## 4.2 Test sobre meses significativos

<sup>43</sup> Al agregar el tiempo como variable exógena se incorpora una tendencia determinística a la regresión.

<sup>44</sup> En términos gráficos,  $B_0$  representa la intersección de la función lineal con el eje de las  $Y$ .

<sup>45</sup> En el límite,  $B_2$  representa la derivada parcial de  $Y_t$  con respecto a  $R_{it}$ .  $\delta Y_t / \delta R_{it} = B_2$

<sup>46</sup> Ver Tannura, Michael e Irwin, Scott. *Weather, Technology, and Corn and Soybean Yields in the U.S. Corn Belt*, pág. 83.

Con el objetivo de comprobar estadísticamente la relación que existe entre las lluvias mensuales y el rinde anual, lo primero que realizo es una regresión lineal para demostrar la significatividad del regresor (Beta) asociado a las precipitaciones mensuales.

Es importante recordar que la utilización de un modelo de regresión lineal implica varios supuestos, los cuales se cumplen en la muestra analizada. Estos supuestos a los que me refiero son:

- **Linealidad:** la ecuación de regresión adopta la forma lineal. La variable dependiente es la suma del origen de la recta, una o más variables independientes y los residuos.
- **Independencia:** los residuos, es decir, las diferencias entre los valores observados y los pronosticados, son independientes entre sí y constituyen una variable aleatoria.
- **Homocedasticidad:** para cada valor de la variable independiente, la varianza de los residuos es constante.
- **Normalidad:** para cada valor de la variable independiente, los residuos se distribuyen normalmente con media cero.
- **No-colinealidad:** no existe relación lineal entre ninguna de las variables independientes.

Al realizar la regresión, se obtienen indicadores “BLUE”, que proviene del inglés y se refiere al mejor estimador lineal insesgado.

#### 4.2.1 Regiones y cultivos

Se elige realizar el test de hipótesis sobre dos cultivos (maíz y soja) en dos estados de Estados Unidos<sup>47</sup> (Iowa e Illinois), dado que estos pertenecen al denominado *Corn Belt* en el *Midwest*<sup>48</sup> norteamericano. Para cuantificar la importancia de esta zona geográfica en cuanto a la producción, tengamos en cuenta que del total de maíz cosechado en 2016 en el conjunto de estos estados (Iowa, Illinois y el resto del *Corn Belt*) la región representó un 62,3% del total de Estados Unidos, mientras que en el caso de la soja, la cifra ascendió

---

<sup>47</sup> La elección de Estados Unidos corresponde a la gran accesibilidad a los datos e información histórica disponible.

<sup>48</sup> El *Midwest* incluye los estados de Illinois, Indiana, Iowa, Minnesota, Missouri, Nebraska y Ohio.



a 63,4%. Por lo tanto, existen cuatro combinaciones estudiadas, a saber: 1. Soja Iowa, 2. Soja Illinois, 3. Maíz Iowa, 4. Maíz Illinois.

#### 4.2.2 Rindes y precipitaciones

Para los rindes anuales de cada cultivo en cada estado, se utilizan los datos del *United States Department of Agriculture* (USDA)<sup>49</sup>, mientras que para las precipitaciones mensuales en los estados se toman los datos que proporciona el *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)<sup>50</sup>. En el caso de los rindes, se toman valores anuales al momento de cosecha, a saber, noviembre en el caso de la soja y diciembre en el caso del maíz.

Cabe aclarar que el dato de precipitaciones en Estados Unidos es medido a través de las denominadas *weather stations*, que son puntos específicos (principalmente aeropuertos) dentro de cada estado en los que el NOAA realiza mediciones. En el caso de Iowa, se toman las ciudades de Des Moines, Waterloo y Sioux City y en el caso de Illinois los centros elegidos son Peoria, Springfield y Belleville. El promedio simple de las lluvias de las tres ciudades de cada estado es determinado como la precipitación representativa<sup>51</sup>. Se utilizan datos de 60 años, es decir, desde 1957 hasta 2016, ya que esta muestra otorga grados de libertad necesarios para realizar los *tests* para cada mes del año. Tanto los datos de rinde como los de precipitaciones fueron obtenidos en las unidades utilizadas en Estados Unidos, a saber, *bushels/acre* en el primer caso y pulgadas en el segundo. Ambos valores fueron convertidos a toneladas por hectárea y milímetros para el análisis<sup>52</sup>.

#### 4.2.3 Resultados y análisis de meses significativos

En primer lugar se corre la regresión lineal entre el rinde anual y la precipitación mensual de cada cultivo en cada estado (12 meses, 2 cultivos, 2 estados), en donde se obtienen los resultados plasmados en el siguiente Cuadro 2:

---

<sup>49</sup> El USDA es el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, ente que divulga estadísticas agrícolas muy completas y detalladas. Para más información visitar <https://www.usda.gov/>

<sup>50</sup> Dentro del NOAA, la *National Weather Service Forecast Office* provee la información histórica utilizada. Para más información visitar <http://www.weather.gov>

<sup>51</sup> Puede observarse en los mapas de los estados en el Apéndice 4 que las ciudades elegidas están dispersas de modo tal de abarcar un área representativa de la superficie total. Puede observarse también el trabajo realizado por Merener, *Globally Distributed Production and the Pricing of CME Commodity Futures*, en el cual se toman en consideración dichas zonas.

<sup>52</sup> Un bushel/acre representa 0,0672 toneladas/hectárea en el caso de la soja y 0,0627 toneladas/hectárea en el caso del maíz. Una pulgada representa 25,4 milímetros.

## CUADRO 2

## Soja

| Localidad | Mes    | Coefficiente B <sub>2</sub> | Estadístico T | R <sup>2</sup> | Observaciones |
|-----------|--------|-----------------------------|---------------|----------------|---------------|
| Iowa      | Agosto | 0,00144                     | 2,16774       | 0,8428         | 60            |
| Illinois  | Julio  | 0,00197                     | 2,15981       | 0,8329         | 60            |
| Illinois  | Agosto | 0,00284                     | 2,97701       | 0,8436         | 60            |

## Maíz

| Localidad | Mes   | Coefficiente B <sub>2</sub> | Estadístico T | R <sup>2</sup> | Observaciones |
|-----------|-------|-----------------------------|---------------|----------------|---------------|
| Illinois  | Julio | 0,00955                     | 2,38282       | 0,7916         | 60            |

Fuente: elaboración propia

Es decir, con un nivel de significatividad del 95%<sup>53</sup>, la precipitación mensual es relevante en agosto para el caso de la soja en Iowa, en julio para el maíz en Illinois y en julio y agosto para la soja en Illinois<sup>54</sup>. Más allá de la conclusión estadística, los meses de julio y agosto son los de la floración de la soja y el maíz en el hemisferio norte y, por este motivo, los que necesitan mayor cantidad de agua y mayor impacto tienen en el rinde.

A modo de ejemplo, en el Gráfico 1 puede observarse el uso de agua diario del maíz en el hemisferio norte. Teniendo en cuenta que la siembra se da en mayo, se observa que en el momento donde mayor cantidad de agua necesita es entre julio y agosto. Lo mismo sucede con la soja, aunque en menor medida. Tiene sentido, por lo tanto, que el B<sub>2</sub> del maíz sea mayor que el de la soja. En el Gráfico 2 se puede ver lo recientemente comentado, y también se aclara que la oferta (cosecha) en el mes 6, medido a partir de la siembra, es incierta y dependerá de las precipitaciones de julio y agosto<sup>55</sup>.

<sup>53</sup> Recordemos que en el *test* realizado, se rechaza la hipótesis nula de que la correlación es igual a cero para valores del estadístico "t" mayores a 2. Ver Apéndice 3.

<sup>54</sup> Es de destacar que el *test* no arrojó ningún mes significativo en el caso de Maíz Iowa. Esto no significa que la precipitación no sea importante para el cultivo, sino simplemente que no se obtuvo dicha conclusión de forma probabilística.

<sup>55</sup> Ver Merener, Op. Cit., pág. 3.

GRÁFICO 1

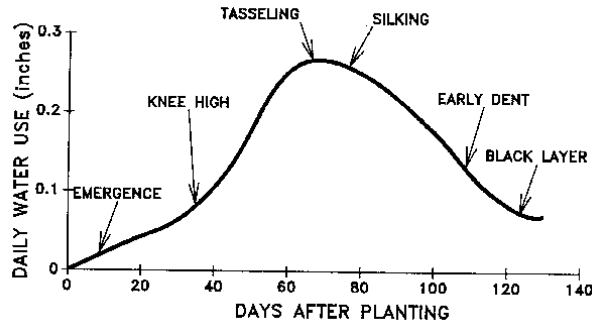
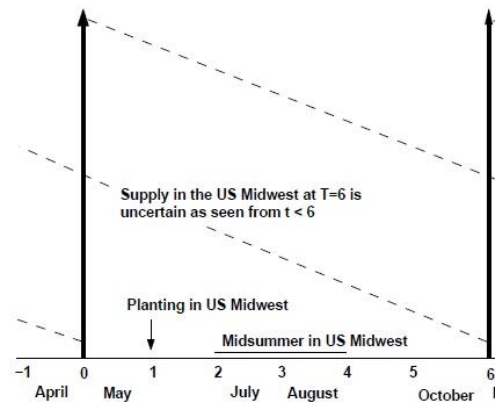


GRÁFICO 2



Fuente: Gráfico 1: *Irrigation Scheduling to improve wáter and energy use efficiencies*. Evans, Robert, Junio 1996. Gráfico 2: *Globally Distributed Production and the Pricing of CME Commodity Futures*. Merener, Nicolás, Junio 2013.

### 4.3 Definición del derivado

#### 4.3.1 Función de pagos y precio del *put*

En mi ejemplo, me baso en dos de los casos mencionados anteriormente, con el objetivo de llegar a la valuación o precio (*fair value*) de la opción. En concreto, trabajo con la Soja Iowa y con el Maíz Illinois, para los meses significativos de agosto y julio, respectivamente. Recordemos que, dado que la derivada parcial de la producción con respecto a la lluvia acumulada en el mes es positiva ( $B_2$  mayor a cero), el problema al que se enfrenta el productor agrícola y tomador de la cobertura, será *hedgearse* ante la escasez de lluvias en dicho mes, lo que le provocaría un rinde a cosecha menor al deseado. Por este motivo, la posición que toma es ir *long* un *put* climático. En la Sección 3.4.1 hemos visto la función de pagos de una opción europea (*put*) de forma genérica. A continuación, presento dicha ecuación con la nomenclatura adaptada al caso del *put* sobre precipitaciones acumuladas mensuales:

$$\text{PAGO PUT} = \text{Max} (\text{Strike} - R_{it}; 0) * \text{Tick} \quad (1)$$

Es decir, el *put* pagará al productor toda vez que la lluvia del mes “i-ésimo” del año “t” sea menor al *strike* establecido. Caso contrario, no se efectuará ningún pago y el comprador de la opción perderá la prima pagada. En mis ejemplos, tomo como *strike* el promedio de precipitaciones de dicho cultivo en ese estado durante los últimos 60 años.

Tengamos en cuenta que el *tick* convierte un valor absoluto de precipitaciones mensuales en un valor expresado en rinde (ton/ha). Es por este motivo que el *tick* correspondiente será justamente diferente para cada cultivo en cada estado y no será otra cosa que el valor del regresor  $B_2$ , que surge del *test* de significatividad de cada mes a partir de mínimos cuadrados ordinarios.

Una de las alternativas dentro del cálculo actuarial, que obtiene el precio de la opción a partir de la información pasada de lluvias, consiste en modelizar las precipitaciones mensuales bajo una distribución de probabilidades y, a partir de ello, realizar una simulación de Montecarlo que arroje resultados hipotéticos de lluvia, para así aplicar la función de pagos del *put* comparada contra un *strike* y obtener la esperanza matemática de los pagos descontados a una tasa libre de riesgo<sup>56</sup>. En este sentido, el precio de la opción será:

$$\text{PRECIO PUT} = \mathbb{E}(\text{PAGO PUT}) * e^{-rt} \quad (2)$$

#### 4.3.2 Simulación de precipitaciones

Hay, por lo tanto, un pago de *put* por cada simulación de lluvia mensual<sup>57</sup>. Para simularlas, la distribución de precipitaciones utilizada es normal, utilizando los valores desde cero a positivos, ya que no pueden existir, por definición, cantidades de lluvia negativas. Con este objetivo, es necesario realizar un histograma de los 60 datos muestrales históricos y luego *testear* mediante “bondad de ajuste” que es apropiado utilizar una distribución normal. Los dos casos utilizados para mi análisis (Soja Iowa en agosto y Maíz Illinois en julio) se someten a los *tests* de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi cuadrado, que son los más utilizados para este fin<sup>58</sup>. En ninguno de los casos, para niveles de significancia de hasta el 99%, se puede rechazar la hipótesis nula, la cual postula que los datos se ajustan a una distribución normal. Los resultados obtenidos se pueden observar en el Apéndice 2.

La simulación de precipitaciones se realiza para 50.000 casos en cada cultivo, y luego es “recortada” mediante un proceso de *trimming* estadístico de forma tal de arribar a 10.000 simulaciones<sup>59</sup>. A continuación se pueden observar en el Cuadro 3 las estadísticas

<sup>56</sup> Para el cálculo se utilizó un “*t*” de 6 meses (entre que se compra la cobertura y la cosecha, fecha en la cual se realiza el pago en caso de corresponder) y una tasa “*r*” de 2%.

<sup>57</sup> Estrictamente hablando, el pago puede ser positivo o nulo, de acuerdo a la función de pagos del *put*.

<sup>58</sup> Los paquetes estadísticos utilizados fueron el Statfit y el @Risk.

<sup>59</sup> A través del *trimming* lo que se realizó fue disminuir los 50.000 casos a 10.000, de manera tal de eliminar los valores muy por encima o por debajo del máximo y mínimo y respetando que la media y desvío estándar de la simulación fueran similares a los de la muestra.

descriptivas de los datos muestrales en comparación con los datos de la simulación. Para esta última, se simula la distribución utilizando la media y desvío estándar muestral así como también el máximo y el mínimo del periodo estudiado.

CUADRO 3

## Soja Iowa Agosto

|            | Mínimo precipitaciones | Máximo precipitaciones | Media precipitaciones | Desvío estándar precipitaciones |
|------------|------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Muestra    | 12,02                  | 239,78                 | 97,57                 | 50,29                           |
| Simulación | 20,00                  | 240,95                 | 104,72                | 44,12                           |

## Maíz Illinois Julio

|            | Mínimo precipitaciones | Máximo precipitaciones | Media precipitaciones | Desvío estándar precipitaciones |
|------------|------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Muestra    | 28,11                  | 186,69                 | 96,06                 | 34,12                           |
| Simulación | 30,05                  | 186,42                 | 101,61                | 32,31                           |

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia en el Cuadro 3, no hay diferencias sustanciales entre los valores muestrales y los obtenidos para la simulación. En resumen, para cada cultivo en cada estado, se procede primero a realizar la simulación de las precipitaciones a partir de la media y desvío muestral con una distribución probabilística normal, luego de ello se define el *strike* contra el cual se realiza la comparación como el promedio simple muestral de los últimos 60 años, posteriormente se calcula el pago del *put* para cada lluvia simulada a partir de la función de pago anteriormente descrita<sup>60</sup> y luego se obtiene el precio del derivado como el descuento a valor presente (6 meses antes de cosecha) del promedio de pagos esperado según las simulaciones<sup>61</sup>.

En el Cuadro 4 presento, a modo de ejemplo, el procedimiento descrito.

<sup>60</sup> Ver Ecuación 1.

<sup>61</sup> Ver Ecuación 2.

CUADRO 4

| Simulación | Lluvia Simulada | Lluvia Strike | Strike-Simulación | Max(Strike-Simulación;0) |
|------------|-----------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| 1          | 66,38           | 96,06         | 29,68             | 29,68                    |
| 2          | 44,70           | 96,06         | 51,36             | 51,36                    |
| 3          | 21,54           | 96,06         | 74,52             | 74,52                    |
| 4          | 186,22          | 96,06         | -90,16            | 0,00                     |
| 5          | 122,48          | 96,06         | -26,42            | 0,00                     |
| ...        | 147,87          | 96,06         | -51,81            | 0,00                     |
| ...        | 97,48           | 96,06         | -1,42             | 0,00                     |
| 9998       | 80,29           | 96,06         | 15,77             | 15,77                    |
| 9999       | 128,52          | 96,06         | -32,46            | 0,00                     |
| 10000      | 152,75          | 96,06         | -56,69            | 0,00                     |

Fuente: elaboración propia

#### 4.4 Ejemplos

A partir del procedimiento señalado, obtengo un *fair value* de la opción, utilizando los parámetros de la muestra histórica de cada cultivo. Recordemos que para llegar al *pricing* de la opción sobre Soja en Iowa y Maíz en Illinois, se utilizan los datos de precipitación mensual y rinde en cosecha de cada uno de los estados.

Ahora bien, un principio básico para que una cobertura o *hedge* tenga sentido es que exista un *basis risk*. Si bien el riesgo base se puede manifestar de diversas maneras, el riesgo geográfico es el que surge dado que el rinde *strike* utilizado tanto histórico (para valorar el derivado) como para realizar el pago de la opción, corresponde a un lugar geográfico de diferente base al de aquel productor que toma la cobertura. Dicho de otra forma, carecería de sentido que un *farmer* de un condado de Iowa o Illinois tomara una cobertura para cubrirse contra la falta de precipitaciones medida contra ese mismo condado.

Es por este motivo que avanzo hacia un tema central de este trabajo, que es justamente tratar de demostrar mediante dos ejemplos, en primer lugar, si los derivados climáticos permiten o no mitigar el riesgo (medido como el desvío estándar) y, para poder *testear* la hipótesis planteada, el derivado debe tener una base diferente a la de la unidad geográfica a la que pertenece el tomador de la cobertura. Es aquí donde surge la segunda pregunta a responder, que consiste en determinar si el productor de un condado específico del estado puede cubrirse con un derivado valuado con información (precipitaciones y rinde) del estado en su conjunto, y que paga según las precipitaciones de todo el estado. En

particular, selecciono un condado (unidad geográfica menor) en cada uno de los estados analizados. A continuación, muestro los ejemplos específicos seleccionados y expongo posteriormente las respuestas a las dos preguntas principales de este trabajo.

#### 4.4.1 Soja Iowa Agosto

En este caso, el condado seleccionado para realizar el *backward testing* de la opción *put* es Sac, ubicado en la zona noroeste del estado de Iowa. A la precipitación de dicha unidad geográfica se le adiciona (en caso de que corresponda) el pago de la opción *priceada* con datos de Iowa para concluir si ésta le permitía al productor de Sac cubrirse (*hedgears*) ante una precipitación mensual menor que la deseada. Además, a este valor (*payoff* bruto) se le debe restar el costo de la cobertura, para obtener así el *payoff* neto.

De este modo, a cosecha, el *payoff* que obtendrá el productor se puede descomponer en dos componentes: el del negocio físico, que consiste en el rinde del condado al que pertenece el campo y el de la cobertura; a ello hay que deducirle el costo pagado por la opción. Es necesario hacer una aclaración con respecto a este tema. Si bien en última instancia el productor recibirá unidades monetarias (y no “magnitudes reales” como lo son las precipitaciones y el rinde), para el cálculo del negocio físico y de la cobertura, realizo todos los cálculos en unidades de precipitaciones. La conversión de las precipitaciones a unidades de rinde se realiza simplemente multiplicando el valor de la lluvia por el regresor  $B_2$ , que es el coeficiente que relaciona ambas variables. Asimismo, para pasar de unidades de rinde a unidades monetarias, basta con multiplicar dicho valor por el precio a cosecha, de modo de obtener un valor en USD/ha.

La razón por la cual mantengo los cálculos en unidades de precipitación es doble. La primera y obvia, es porque este trabajo pretende estudiar los derivados climáticos sobre precipitaciones (esto no significa que no haya un impacto sobre rinde, dado que sino no tendría sentido el estudio; de hecho, el impacto fue previamente calculado). La segunda razón se debe a que, al obtener a través de la valuación un costo del *put* fijo, resulta más exacto mantener a éste en unidades de lluvia (que no presentan un componente tendencial), que en unidades de rinde (que sí lo presentan). Es decir, si se convirtiera a unidades de rinde (sin realizar ningún ajuste), el costo que es fijo resultaría “exagerado” para los valores de rindes más bajos que son los correspondientes a años más alejados. Por lo tanto, decido mantener los cálculos en términos de precipitaciones<sup>62</sup>.

---

<sup>62</sup> Es factible incorporar un componente tendencial para solucionar este problema realizando una regresión entre el rinde y el tiempo e incorporándolo al análisis, de modo que el costo de la prima esté ajustado por el paso del tiempo. Considero más exacto, de todas maneras, calcularlo en magnitudes “reales” como lo es la precipitación.

De este modo, teniendo en consideración lo señalado, los diferentes *payoffs* y el costo quedan presentados de la siguiente manera:

**PAYOFF BRUTO:** *Payoff* físico + *Payoff* cobertura

**PAYOFF FÍSICO:** Precipitación del condado

**PAYOFF COBERTURA:** (Precipitación *Strike* - Precipitación Estado), medido en términos de lluvia, y con un *strike* correspondiente al promedio histórico del Estado.

**COSTO:**  $\mathbb{E}(\text{PAGO PUT}) * e^{-rt}$ , definido en la ecuación (2) y medido en términos de lluvia

**PAYOFF NETO:** *Payoff* bruto - Costo

Más adelante volveré, con los datos concretos, sobre cada uno de los componentes del *payoff* neto y la importancia de los mismos a la hora de determinar si la cobertura es útil o no para mitigar el riesgo.

Tomando como *strike* un valor de precipitaciones de agosto de 97,57 milímetros (correspondiente a los 60 años comprendidos entre 1957 y 2016) y comparando las precipitaciones simuladas contra ese valor, aplicando la función de pagos y luego obteniendo el precio del *put*, se obtiene que el *fair value* del mismo es de 14,50 milímetros de lluvia. El precio, costo o *fair value* es aquel que justamente hace que, en promedio, el tomador de la cobertura no gane ni pierda. Recordemos que este valor puede ser posteriormente multiplicado por el *tick* (que definí como el regresor  $B_2$ ), de modo de obtener el valor de precipitaciones convertido a rinde. Hay que tener en cuenta algo ya señalado previamente: para convertir este valor a unidades monetarias basta con multiplicar el costo en términos de rinde por el precio de venta del cultivo (USD/ton), lo que dará un valor medido en USD/ha. Por los motivos ya expuestos, y al asumir que no existe riesgo precio (i.e., el precio de venta es único, ya sea futuro o físico en cosecha (precio *spot*)), trabajo con los valores en unidades de precipitaciones y no en rinde ni en unidades monetarias.

La aclaración arriba realizada da lugar a profundizar acerca de la metodología utilizada para determinar si este tipo de instrumentos son útiles para mitigar el riesgo y, en particular, si *hedgearse* con un instrumento valuado con variables del estado entero y que paga ante la escasez de lluvias de todo el estado vs. el *strike*, permite a un productor particular de un campo en un condado específico cubrirse con dicho derivado.

Para llegar a una conclusión acertada y completa hay que tener en cuenta algunos elementos que son importantes a la hora de realizar el análisis de los resultados. Si se considera lo sucedido en los últimos 60 años con la opción sobre soja en Iowa para la



cobertura de un productor en el condado específico de Sac, se concluye que, de los 60 años, la opción habría pagado en 36 ocasiones y no habría pagado en 24. En términos de porcentaje, se habría generado *payoff* positivo de la cobertura en el 60% de los casos mientras que no se habría generado en el 40% restante. Esto tiene sentido intuitivo dado que, al utilizar como *strike* el promedio de la muestra y por la distribución probabilística que siguen las precipitaciones, es de esperar que, con cierto margen de error, alrededor de la mitad de los años las lluvias se ubiquen por encima del *strike* y la otra mitad se ubiquen por debajo. En el siguiente Gráfico 3, muestro la forma que toma el *payoff* del *put*, marcando que las precipitaciones se distribuyen normalmente alrededor de la media seleccionada como *strike*.

GRÁFICO 3



Fuente: elaboración propia

Ahora bien, a este valor es necesario descontarle el costo de la opción para concluir si en términos netos el productor habría obtenido, aun pagando el precio del *put*, un monto de precipitación (físico más cobertura) mayor que el que habría obtenido si no se cubría. Considerando el costo, de los 36 casos en los cuales el derivado le habría pagado, en 26 (72% de los años), el *payoff* neto habría permanecido positivo y en 10 casos el costo habría sido más alto que el beneficio bruto obtenido por tomar el *put*.

Por lo tanto, considerando sólo la decisión en términos de “pago” contra “no pago”, la cobertura parece resultar, en promedio, indicada, dado que cuando la precipitación real es menor al *strike*, el instrumento paga por lo general más que el costo. Si bien el productor no sabe *ex-ante* de tomar la decisión de cubrirse si le servirá o no, sí conoce el costo de la prima y el *strike*. Estos dos valores serán fundamentales y generarán sensibilidad en el *payoff* neto.

Con respecto a la prima pagada, la conclusión que obtengo es que, en este caso, no fue un factor decisivo en el sentido de que, de las veces que el derivado pagó, la prima sólo fue mayor que lo que cobró el productor en menos de un tercio de las ocasiones. Es decir, no constituyó un costo “exagerado”. Pero esto está íntimamente ligado con el *strike* seleccionado. La razón es que el *strike* entra en juego en la valuación y los resultados por dos vías. Por un lado, a mayor *strike* seleccionado para valuar la opción, más cara será la misma, dado que generará mayores pagos esperados descontados<sup>63</sup>. Pero a la vez, ya valuada la opción, y considerando los casos en que la opción paga (dado que caso contrario el monto es nulo), a mayor *strike* definido, mayor el pago realizado.

Por último, también es interesante resaltar que si bien la precipitación real del condado influye en el *payoff* neto (negocio físico+cobertura-costo) que tendrá el productor, ésta no tiene incidencia alguna en el resultado de la cobertura, por lo tanto el mismo será influenciado en última instancia, por el *strike* definido, el cual también repercute en el costo de la prima. En términos matemáticos, puedo expresar lo recientemente dicho haciendo alusión a la derivada del *payoff* neto con respecto al *strike*, para analizar si el componente del *payoff* bruto es mayor que el del costo y, en total, la derivada es positiva. A continuación, se puede observar:

$$\delta \text{Payoff neto} / \delta \text{Strike} = (\delta \text{Payoff bruto} / \delta \text{Strike}) + (\delta \text{Costo} / \delta \text{Strike})$$

$$\text{Payoff bruto} = \text{Precipitación condado} + (\text{Strike} - \text{Precipitación Estado})^+$$

$$\text{Por lo tanto, } \delta \text{Payoff bruto} / \delta \text{Strike} = 1$$

$$\text{Costo} = (\sum_{i=1}^n 1/n \text{Max}(\text{Strike} - \text{Precipitación simulada}; 0)) * e^{-rt}$$

Dado que existe la función “máximo” en el cálculo del costo, éste crecería de forma lineal con el *strike* sólo cuando se estuviera comparando contra valores mayores a la máxima precipitación simulada (escenario que carece de sentido ya que no tendría lógica tomar como *strike* un valor más alto que el máximo de las precipitaciones simuladas). Para valores normales de *strike* (que no superan el máximo de precipitación simulada), si bien la suba del mismo genera incrementos en el costo, el aumento en el *strike* genera subas menos que proporcionales en el costo. Aun así, el valor máximo que podría tomar la variación del costo ante cambios en el *strike* (que se daría cuando se está considerando valores más altos que la máxima precipitación simulada, lo cual carece de sentido), es:

$$\delta \text{Costo} / \delta \text{Strike} = n * 1/n * 1 * e^{-rt} = 1 * e^{-rt} < 1$$

<sup>63</sup> Esto está en línea con los datos que muestra el Cuadro 1 de la Sección 3.1.1, donde se indica que a mayor *strike price*, mayor es el precio de la opción europea.

Es decir, la ecuación anterior refleja que ante variaciones en el *strike*, el aumento que se produce en el *payoff* bruto será siempre mayor que el del costo. En otras palabras, en la sensibilidad del *payoff* neto ante variaciones del *strike*, pesa más el componente del *payoff* bruto que el del costo.

El Cuadro 5 sirve para analizar la variación de los resultados ante cambios en el *strike* seleccionado, del cual, en última instancia, dependen todos los demás resultados y conclusiones. Se observa aquí lo expresado en el párrafo precedente:

CUADRO 5

| Strike (mm. Lluvia) | Prima (en mm) | Años que paga | Años con Payoff neto positivo | Años pago/Años totales (60) |
|---------------------|---------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 77,57               | 7,05          | 26            | 19                            | 43%                         |
| 82,57               | 8,62          | 26            | 22                            | 43%                         |
| 87,57               | 10,38         | 28            | 26                            | 47%                         |
| 92,57               | 12,34         | 33            | 26                            | 55%                         |
| <b>97,57</b>        | <b>14,5</b>   | <b>36</b>     | <b>26</b>                     | <b>60%</b>                  |
| 102,57              | 16,85         | 36            | 28                            | 60%                         |
| 107,57              | 19,41         | 39            | 28                            | 65%                         |
| 112,57              | 22,18         | 41            | 29                            | 68%                         |
| 117,57              | 25,16         | 44            | 33                            | 73%                         |

Fuente: elaboración propia

Como se puede notar, la prima es creciente con el *strike* definido. Esto se debe a que, en caso de pago del derivado, a mayor *strike* mayor es el monto que recibe el productor por la cobertura. Asimismo, a mayor *strike* también es mayor la cantidad de años en los que el derivado paga, ya que es más probable que la precipitación acumulada real sea menor que ese valor fijo. El incremento del *strike* también genera que, si bien el costo de la prima aumenta, el *payoff* neto se torna más positivo. Es decir, la variación de *payoff* neto es más dependiente del cambio en el *payoff* bruto que del cambio en el costo (esto ha sido constatado matemáticamente más arriba).

Habiendo dicho lo anterior, el tema puntual que me interesa poder demostrar, objeto de la realización de este trabajo, es si efectivamente se redujo el riesgo (medido como desvío estándar) del productor agropecuario gracias a la utilización de la cobertura. En este sentido, la desigualdad que debería cumplirse es la siguiente:

**DESVÍO ESTÁNDAR (NEGOCIO FÍSICO) > DESVÍO ESTÁNDAR (NEGOCIO FÍSICO + COBERTURA – COSTO)**

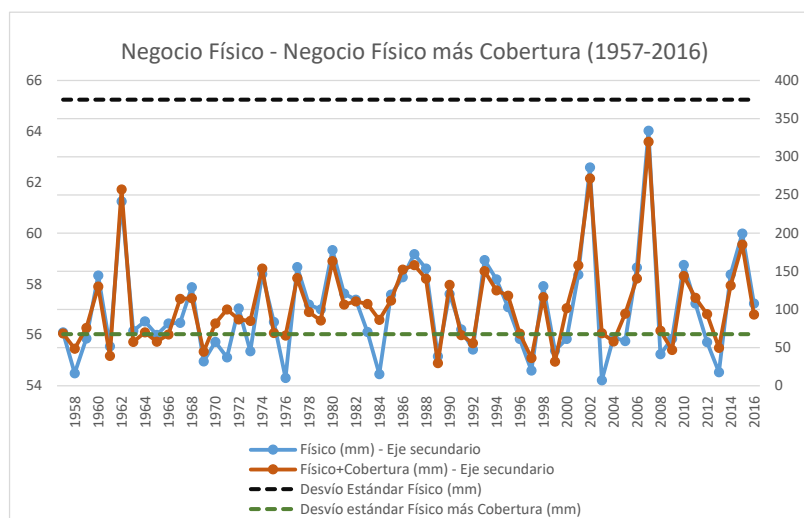
Es importante aclarar aquí un punto importante que hace a la utilización de derivados en general. Para determinar si el uso del *put* sobre precipitaciones mensuales acumuladas habría mitigado el riesgo del productor, no es necesario que en cada año el tomador de la cobertura obtenga *payoff* neto positivo. Pueden existir, incluso, años donde la misma sea tomada y no sea necesaria (en este ejemplo, que la lluvia real sea mayor que el *strike*, un resultado que el *farmer* conocerá *ex post* haber incurrido en ella). En cambio, lo que sí interesa, es que el riesgo de toda la serie de años en análisis (cuantificado como desvío estándar de los flujos) sea disminuido por el uso del instrumento. Esto es lo que analizaremos a continuación. Lo presento, además del periodo de análisis completo, por periodos de 10 años. Esto sirve para hacer hincapié en algunos puntos de los resultados que pueden tener leves diferencias según el lapso de años estudiado.

- 1957-2016

En el periodo de estudio completo, entre 1957 y 2016, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 65,25 mm. de lluvia a uno de 56,03 mm. Esto significó una reducción de 14,1% en el riesgo.

**1957-2016**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 65,25                       | 56,03                                 | -14,1%     |



Fuente: elaboración propia

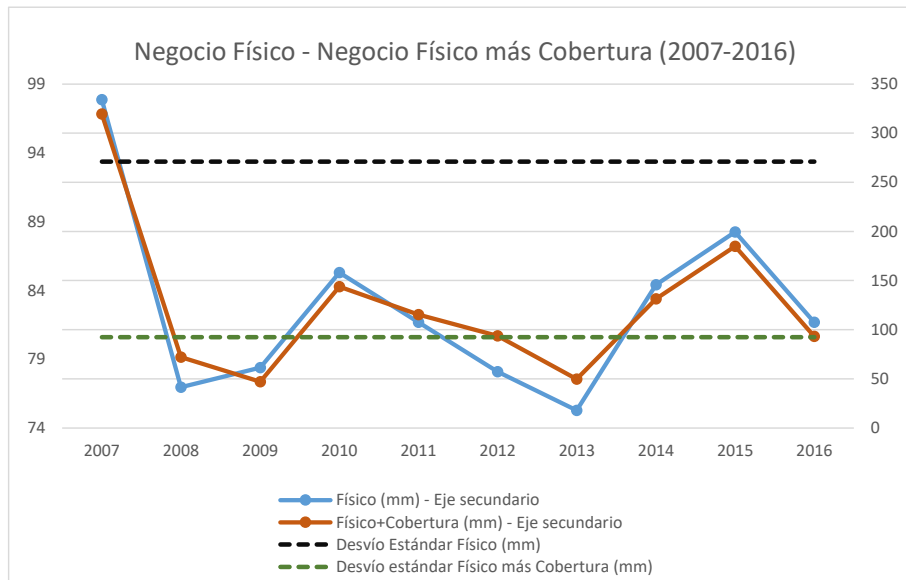
Si bien es muy interesante observar los resultados para el periodo completo, resulta útil también descomponer los efectos en sub-períodos de 10 años. Esto lo hago porque, más allá de la notable reducción en el riesgo que habría enfrentado el productor para todo el periodo de 60 años, existen diferencias según el decenio que se tome en consideración.

- 2007-2016

En el periodo entre 2007 y 2016, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 93,36 mm. de lluvia a uno de 80,60 mm. Esto significó una reducción de 13,7% en el riesgo.

**2007-2016**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 93,36                       | 80,60                                 | -13,7%     |



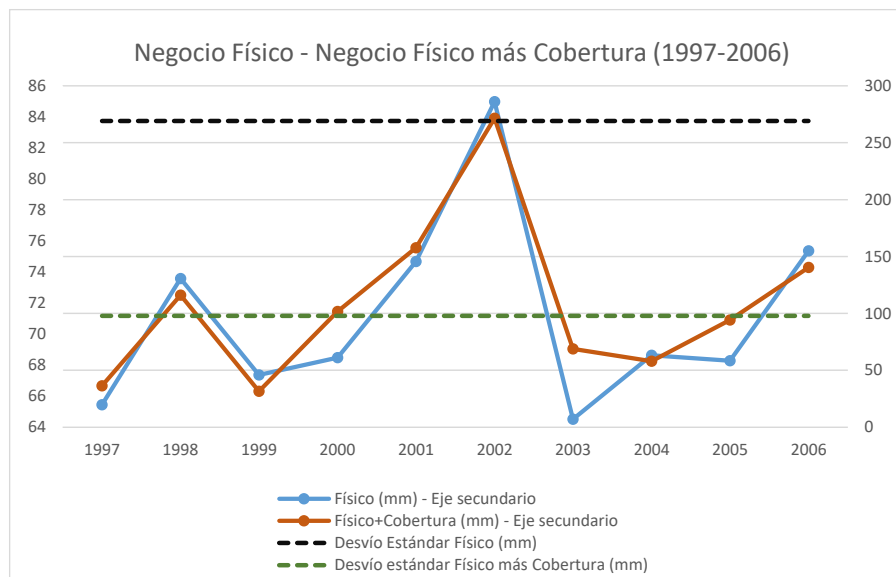
Fuente: elaboración propia

- 1997-2006

En el periodo entre 1997 y 2006, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 83,74 mm. de lluvia a uno de 71,17 mm. Esto significó una reducción de 15,0% en el riesgo.

**1997-2006**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 83,74                       | 71,17                                 | -15,0%     |



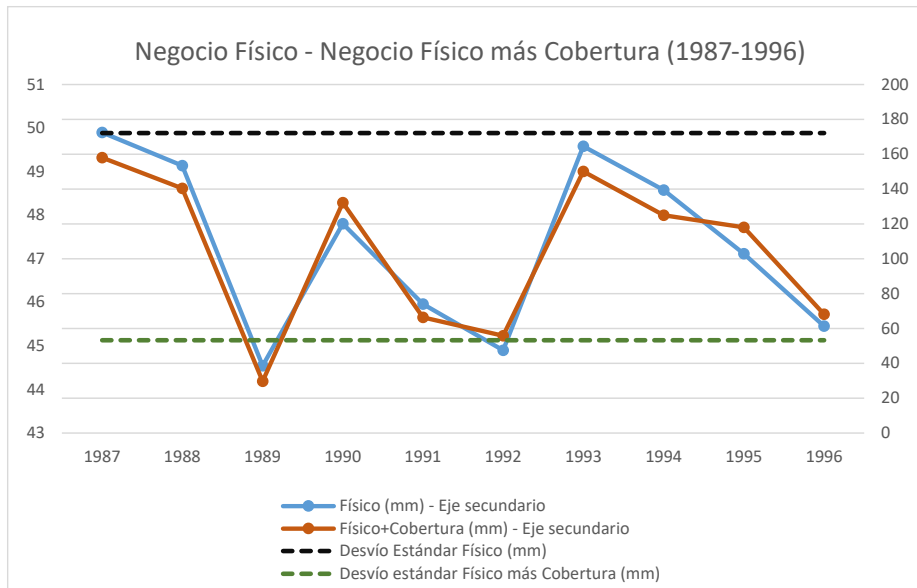
Fuente: elaboración propia

- 1987-1996

En el periodo entre 1987 y 1996, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 49,88 mm. de lluvia a uno de 45,13 mm. Esto significó una reducción de 9,5% en el riesgo.

**1987-1996**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 49,88                       | 45,13                                 | -9,5%      |



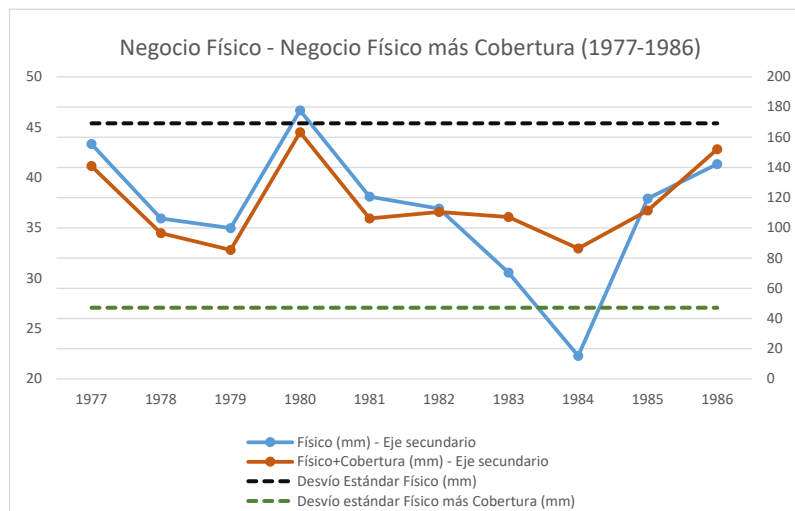
Fuente: elaboración propia

- 1977-1986

En el periodo entre 1977 y 1986, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 45,39 mm. de lluvia a uno de 27,06 mm. Esto significó una reducción de 40,4% en el riesgo.

**1977-1986**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 45,39                       | 27,06                                 | -40,4%     |



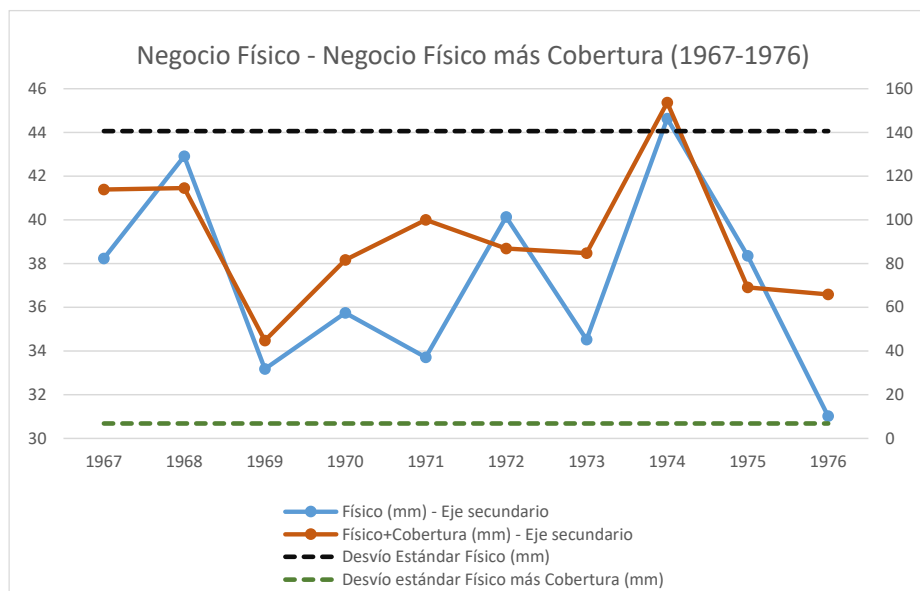
Fuente: elaboración propia

- 1967-1976

En el periodo entre 1967 y 1976, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 44,05 mm. de lluvia a uno de 30,68 mm. Esto significó una reducción de 30,4% en el riesgo.

**1967-1976**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 44,05                       | 30,68                                 | -30,4%     |



Fuente: elaboración propia

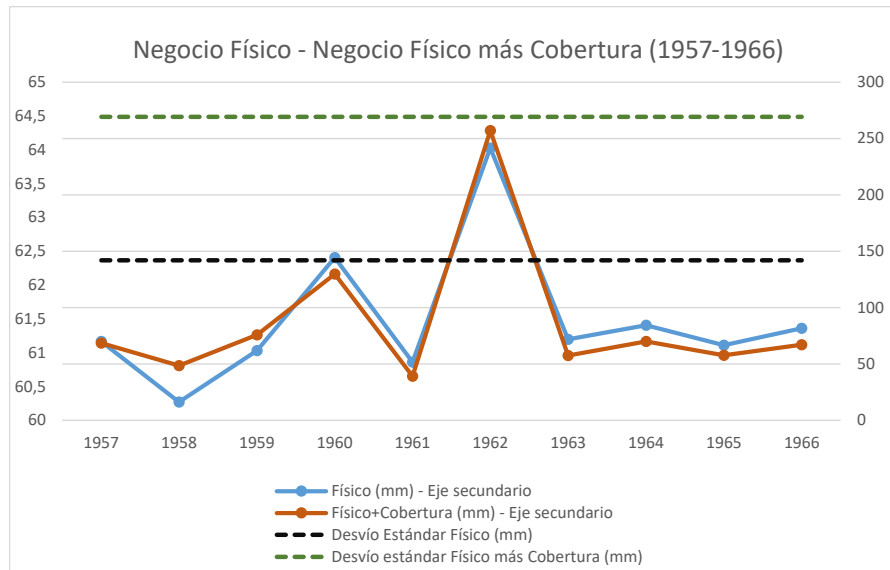
- 1957-1966

En el periodo entre 1957 y 1966, la utilización de la cobertura tuvo el efecto contrario al buscado. El productor pasó de un desvío estándar de 62,37 mm. de lluvia a uno de 64,49 mm. Esto significó un aumento de 3,4% en el riesgo.

**1957-1966**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 62,37                       | 64,49                                 | 3,4%       |





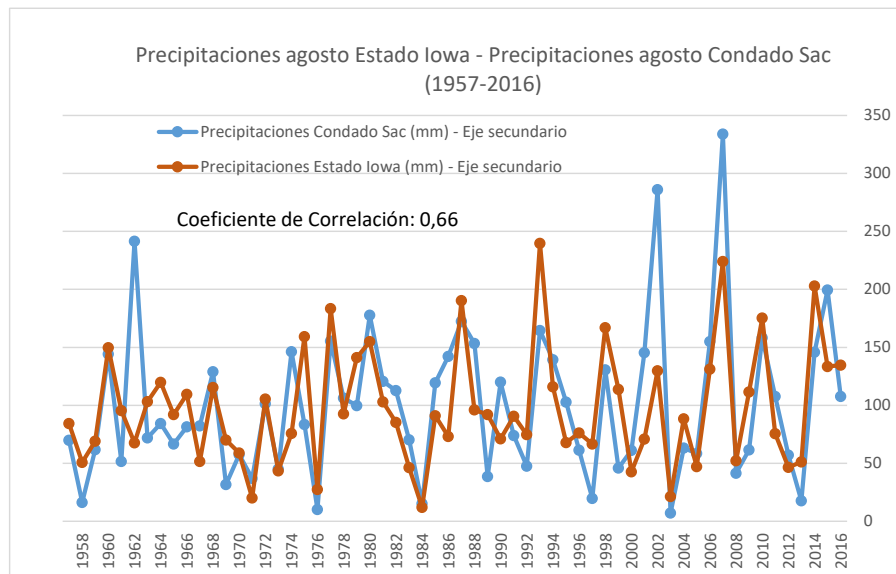
Por lo tanto, a excepción del decenio comprendido entre 1957-1966, en todos los demás hubo una reducción en el desvío estándar que enfrentó el productor, así como también en el periodo completo de 60 años. El que mayor baja tuvo fue el comprendido entre 1977-1986, donde el riesgo se redujo en 40,4% debido al uso del derivado. Por el contrario, en el decenio 1957-1966, el desvío aumentó un 3,4%.

Un segundo interrogante al que trato de dar respuesta con mi trabajo, se refiere a determinar, dado que existe riesgo base en el armado del derivado, si la utilización del *put* es útil de todos modos para mitigar el riesgo (desvío estándar) del productor. En primer lugar, a partir de la demostración de la reducción del desvío estándar realizada más arriba concluyo que, en este ejemplo, el productor del condado de Sac que optó por cubrirse con una protección elaborada con información de precipitaciones y rindes de todo el estado, logró su objetivo de reducir el riesgo tanto de todo el período como medido por lapsos de a 10 años (a excepción del decenio de 1957-1966).

En este punto, el correcto funcionamiento del derivado estará ligado directamente con la correlación que haya entre las precipitaciones de la zona geográfica particularmente cubierta y las del estado en su conjunto.

En el siguiente Gráfico 4, se puede observar la evolución de las lluvias tanto en el estado de Iowa como en el condado de Sac.

GRÁFICO 4

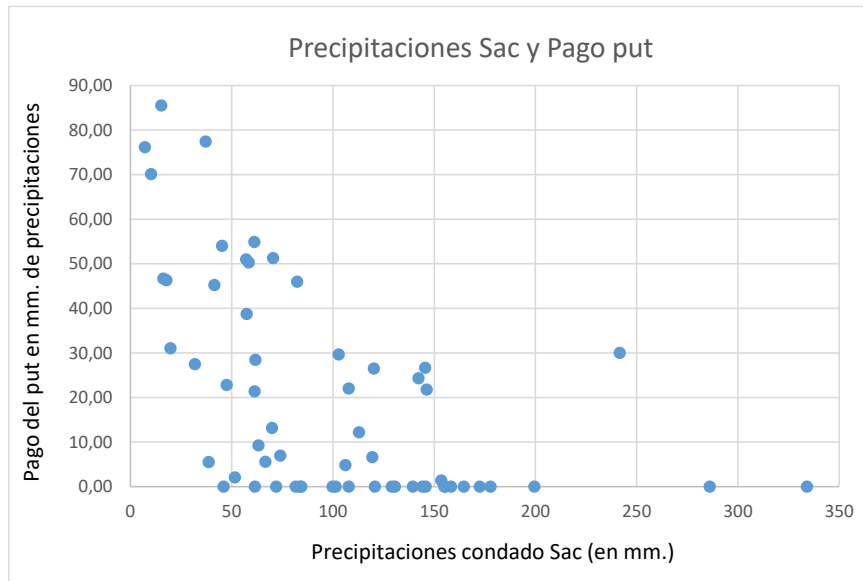


Fuente: elaboración propia

Tal como se observa gráficamente, si bien no es perfecta, la correlación entre las lluvias mensuales de agosto es suficiente para permitir tomar la cobertura sin mayores inconvenientes en cuanto al cumplimiento del objetivo de cobertura. El índice de correlación entre ambas series es de 0,66. Por supuesto, puede suceder que haya años en los cuales el pago del derivado es necesario pero no se recibe; o se recibe pero no es necesario o, si bien se recibe, el monto es menor de lo que sería necesario. Aun así, y tal como remarco en los párrafos precedentes, el derivado con riesgo base geográfico cumplió con su objetivo de reducir el riesgo (es decir, disminuyó el desvío estándar) del productor agropecuario, tanto para el periodo de 60 años completo, como para la gran mayoría de las décadas en estudio.

En el Gráfico 5 presento un *scatter plot* entre las precipitaciones del condado de Sac y el pago del *put*, en milímetros de lluvia. Este último valor se desprende de la función de pagos y puede tomar valores positivos o cero. Como es de esperar, si el derivado está bien construido, la imagen muestra que a valores menores de precipitación en el condado corresponden montos mayores de pago del derivado. Esto afirma, por un lado, que una primera condición necesaria para la utilidad del derivado se cumple, ya que paga más cuanto más bajas son las precipitaciones (quedó demostrado también que el pago suele ser mayor que el costo y que se reduce el riesgo medido en desvío estándar) y, en segundo lugar, que se puede utilizar el *put* valuado en Iowa para cubrir las lluvias del condado de Sac.

GRÁFICO 5



Fuente: elaboración propia

#### 4.4.2 Maíz Illinois Julio

Habiendo presentado el caso de la soja en Iowa para el mes de agosto, y a partir de las conclusiones expuestas, considero útil pasar ahora a analizar el ejemplo para el otro cultivo estudiado y en el otro estado, es decir, maíz en Illinois, para cubrir la falta de precipitaciones durante el mes de julio, el cual obtuve como significativo a partir de la regresión lineal.

En este ejemplo, el condado seleccionado es Coles, ubicado en la zona sudeste del estado. Es al rinde de este condado al que se le adiciona, si corresponde, el pago de la opción. El *pricing* de la misma se realiza con datos de Illinois, con el objetivo de determinar (al igual que en el ejemplo de Iowa) si su utilización le habría permitido al productor de Coles cubrirse (*hedgears*) ante una precipitación acumulada durante julio menor que la deseada.

En este caso, el *strike* utilizado es un valor de precipitaciones de julio de 96,06 milímetros para el periodo de 60 años comprendido entre 1957 y 2016. Dicho valor debe ser comparado contra las precipitaciones simuladas mediante la función de distribución de probabilidades, y luego se aplica la función de pagos para obtener el precio del *put*. El *fair value* del mismo es de 10,46 milímetros de lluvia. Si bien esto ya ha sido comentado, recordemos que el precio, costo o *fair value* es el que hace que, en promedio, el tomador

de la cobertura no gane ni pierda. Este valor puede ser posteriormente multiplicado por el *tick* (regresor  $B_2$ ), para obtener el valor de precipitaciones convertido a rinde. Tal como ya señalé anteriormente, para transformar este valor a unidades monetarias basta con multiplicar el costo en términos de rinde por el precio de venta del cultivo (USD/ton), lo que dará un valor medido en USD/ha. Por simplicidad, y al asumir que no existe riesgo precio (el precio de venta es único, ya sea futuro o físico en cosecha (precio *spot*)), trabajo con los valores en unidades de precipitaciones y no en rinde ni en unidades monetarias.

Al igual que en el ejemplo anterior, busco comprobar si este tipo de instrumento es útil para reducir el riesgo y, en particular, si *hedgearse* con un instrumento valuado con variables de todo el estado y que paga ante la falta de lluvias del estado vs. el *strike*, permite a un productor particular de un campo en un condado específico cubrirse con este derivado.

Al analizar lo sucedido en los últimos 60 años con la opción sobre maíz en Illinois para la cobertura de un productor en el condado de Coles, se obtiene que del total de años, la opción habría pagado en 32 ocasiones y no habría pagado en 28. En términos de porcentaje, se habría generado *payoff* bruto de la cobertura en el 53% de los casos mientras que no se habría generado en el 47% restante. Como ya he dicho, este resultado tiene sentido intuitivo dado que se utiliza como *strike* el promedio de la muestra. Por la distribución probabilística que siguen las precipitaciones, es de esperar que alrededor de la mitad de los años las lluvias se ubiquen por encima del *strike* y la otra mitad se ubiquen por debajo.

Para obtener conclusiones acertadas, es necesario descontar al *payoff* bruto el costo de la opción de modo de determinar si en términos netos se habría obtenido, aun pagando el precio del *put*, un monto de precipitación (físico más cobertura) mayor que el que se habría obtenido si no se tomaba la cobertura. Teniendo en cuenta el costo, de los 32 casos en los cuales el derivado le habría pagado, en 26 (81% de las veces), el *payoff* neto habría permanecido positivo y en 6 casos el costo haría sido más alto que el beneficio bruto obtenido por el *put*.

Al igual que antes, considerando la decisión en términos de “pago” contra “no pago”, la cobertura resulta, en promedio, indicada, ya que cuando la precipitación real es menor al *strike*, el instrumento paga en general más que el costo. La prima sólo fue mayor que lo que cobró el productor en menos de un quinto de las ocasiones. Esto está ligado con el *strike* seleccionado por los motivos ya señalados anteriormente en el ejemplo de la soja, es decir, que el *strike* entra en juego en la valuación y los resultados por dos vías.

Al igual que comenté anteriormente, si bien la lluvia real del condado influye en el *payoff* neto que tendrá el productor, ésta no tiene incidencia en el resultado de la cobertura, por lo tanto la misma será influenciada en última instancia, por el *strike* definido, el cual también repercute en el costo de la prima. Recordemos que el efecto de la variación del *strike* es más grande en el *payoff* bruto que en el costo y, por lo tanto, a mayor *strike*, si bien el costo sube, el *payoff* neto también subirá.

En el Cuadro 6 muestro la sensibilidad de los resultados obtenidos ante variaciones en el *strike* seleccionado, del cual, indirectamente, dependen todos los demás resultados y conclusiones.

CUADRO 6

| Strike (mm. Lluvia) | Prima (en mm) | Años que paga | Años con Payoff neto positivo | Años pago/Años totales (60) |
|---------------------|---------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 76,06               | 3,92          | 18            | 15                            | 30%                         |
| 81,06               | 5,17          | 22            | 18                            | 37%                         |
| 86,06               | 6,66          | 26            | 20                            | 43%                         |
| 91,06               | 8,41          | 29            | 23                            | 48%                         |
| <b>96,06</b>        | <b>10,46</b>  | <b>32</b>     | <b>26</b>                     | <b>53%</b>                  |
| 101,06              | 12,8          | 34            | 27                            | 57%                         |
| 106,06              | 15,42         | 38            | 29                            | 63%                         |
| 111,06              | 18,3          | 40            | 30                            | 67%                         |
| 116,06              | 21,46         | 42            | 32                            | 70%                         |

Fuente: elaboración propia

Los resultados son los mismos que en el caso de la soja. La prima es creciente con el *strike* definido ya que, en caso de pago del derivado, a mayor *strike*, mayor es el monto que recibe el productor por la cobertura. Cuanto mayor es el *strike* también es mayor la cantidad de años en los que el derivado paga, debido a que es más probable que la precipitación acumulada real sea menor que el valor fijo predeterminado. Aquí también se ve numéricamente lo explicado más arriba. La suba del *strike* genera que, si bien el costo de la prima aumenta, el *payoff* neto se torna más positivo. Es decir, la variación de *payoff* neto es más sensible al cambio en el *payoff* bruto que al cambio en el costo.

Paso ahora a la demostración de si efectivamente se redujo el riesgo (medido como desvío estándar) del productor agropecuario a partir de la utilización de la cobertura. Recordemos la desigualdad que debe cumplirse:

**DESVÍO ESTÁNDAR NEGOCIO FÍSICO > DESVÍO ESTÁNDAR NEGOCIO FÍSICO + COBERTURA – COSTO**

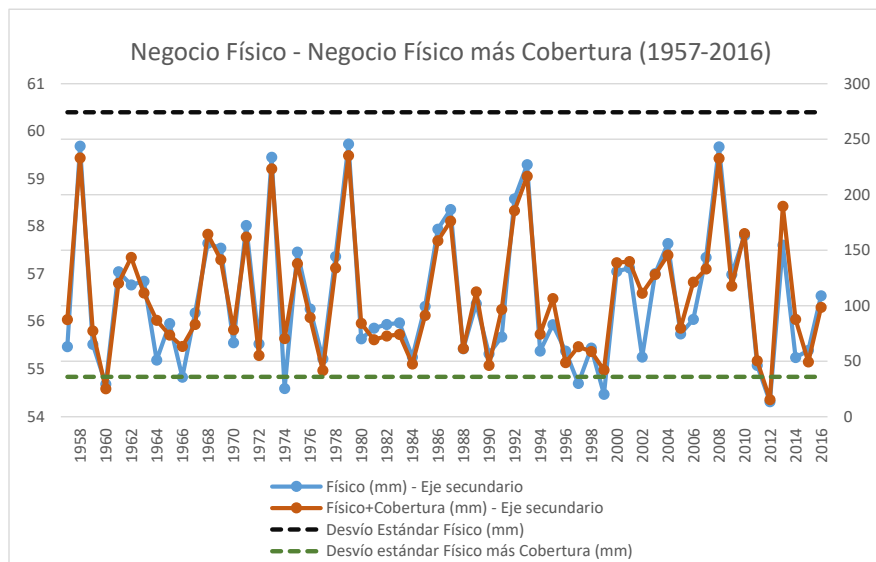
A continuación analizaremos que, en el agregado del periodo estudiado, el riesgo de toda la serie haya disminuido utilizando la cobertura en comparación al negocio físico sin cobertura. También desagregaré por decenios el análisis, de modo de remarcar si hubo sub-períodos en donde las magnitudes fueron más relevantes.

- 1957-2016

En el periodo de estudio completo, entre 1957 y 2016, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 60,40 mm. de lluvia a uno de 54,84 mm. Esto significó una reducción de 9,2% en el riesgo.

**1957-2016**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 60,40                       | 54,84                                 | -9,2%      |



Fuente: elaboración propia

Es interesante ahora descomponer los efectos en periodos de 10 años. Tal como ya he mencionado, más allá de la reducción en el riesgo a la que se habría enfrentado el

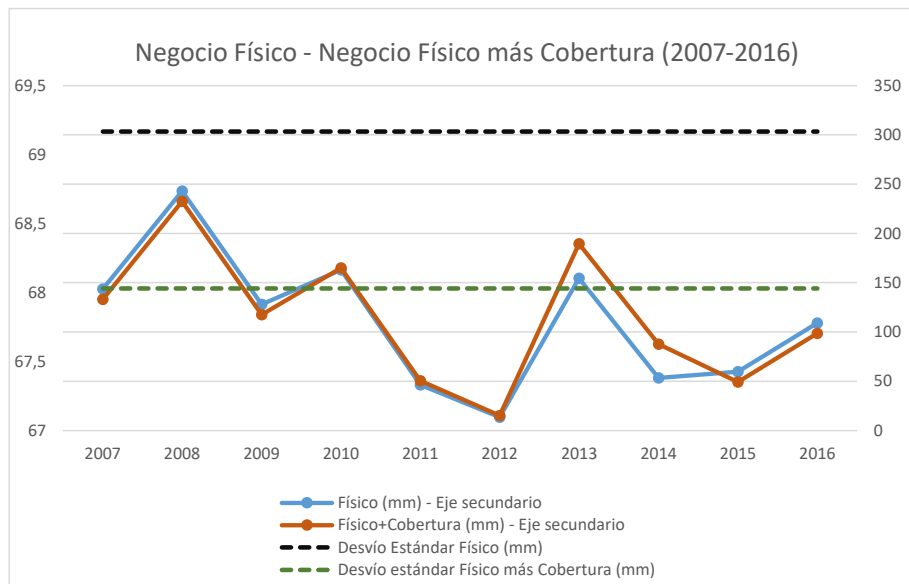
productor para todo el periodo de 60 años, existen diferencias según el decenio que se considere.

- 2007-2016

En el periodo entre 2007 y 2016, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 69,17 mm. de lluvia a uno de 68,03 mm. Esto significó una reducción de 1,6% en el riesgo.

**2007-2016**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 69,17                       | 68,03                                 | -1,6%      |



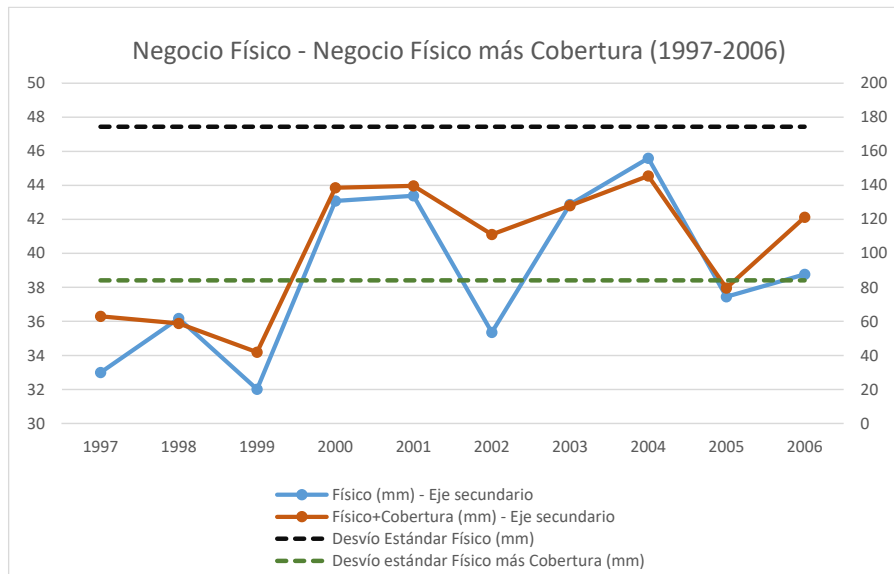
Fuente: elaboración propia

- 1997-2006

En el periodo entre 1997 y 2006, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 47,44 mm. de lluvia a uno de 38,41 mm. Esto significó una reducción de 19,0% en el riesgo.

**1997-2006**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 47,44                       | 38,41                                 | -19,0%     |



Fuente: elaboración propia

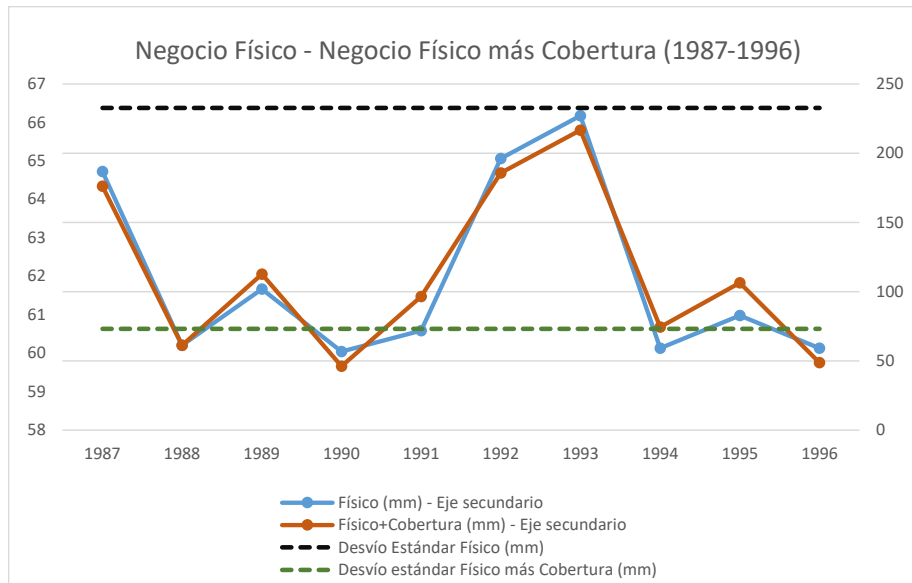
- 1987-1996

En el periodo entre 1987 y 1996, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 66,37 mm. de lluvia a uno de 60,63 mm. Esto significó una reducción de 8,7% en el riesgo.

**1987-1996**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 66,37                       | 60,63                                 | -8,7%      |





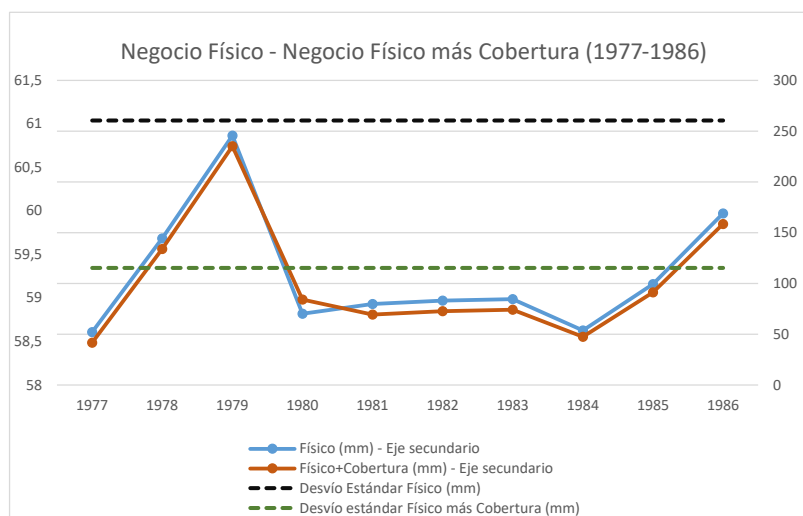
Fuente: elaboración propia

- 1977-1986

En el periodo entre 1977 y 1986, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 61,04 mm. de lluvia a uno de 59,35 mm. Esto significó una reducción de 2,8% en el riesgo.

**1977-1986**

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 61,04                       | 59,35                                 | -2,8%      |



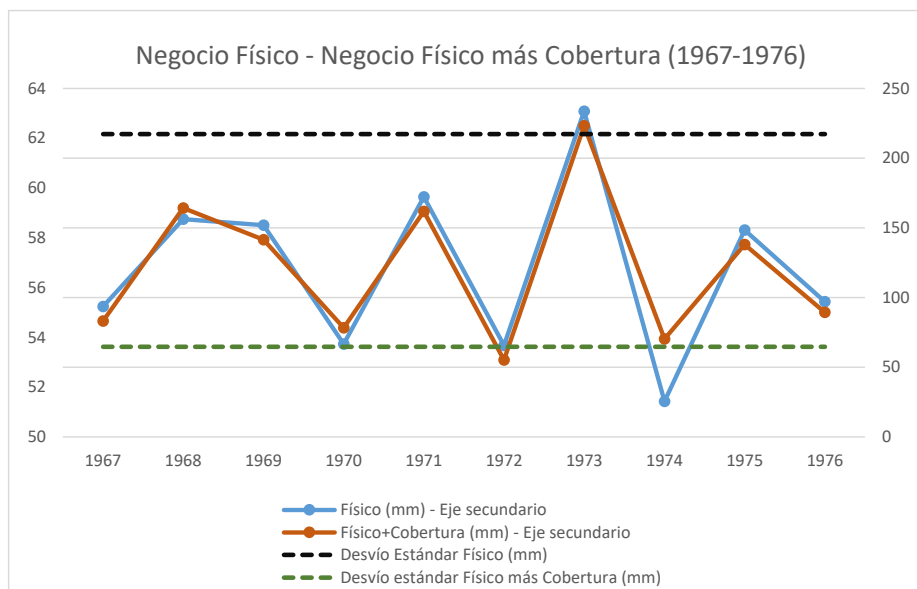
Fuente: elaboración propia

- 1967-1976

En el periodo entre 1967 y 1976, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 62,16 mm. de lluvia a uno de 53,62 mm. Esto significó una reducción de 13,7% en el riesgo.

#### 1967-1976

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 62,16                       | 53,62                                 | -13,7%     |



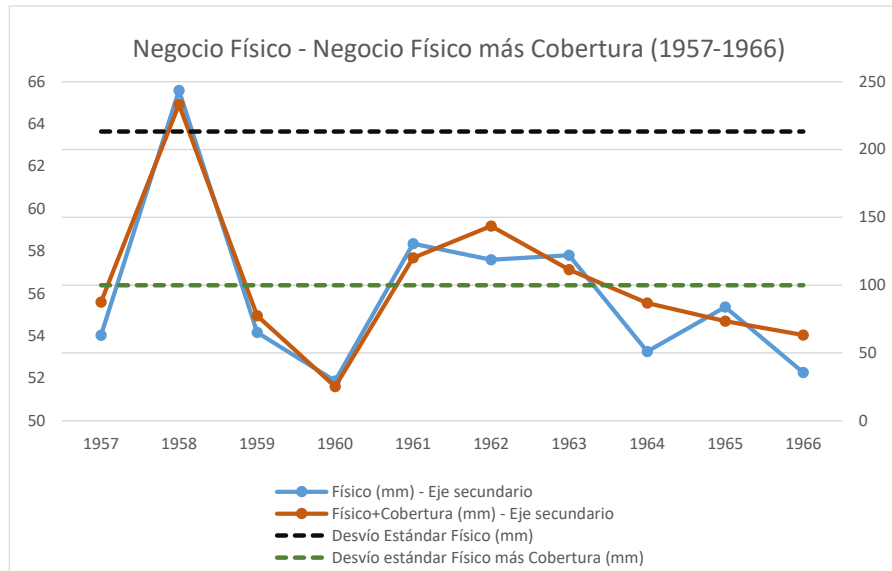
Fuente: elaboración propia

- 1957-1966

En el periodo entre 1957 y 1966, la utilización de la cobertura permitió al productor pasar de un desvío estándar de 63,65 mm. de lluvia a uno de 56,40 mm. Esto significó una reducción de 11,4% en el riesgo.

#### 1957-1966

| Desvío Estándar Físico (mm) | Desvío Estándar Físico+Cobertura (mm) | Diferencia |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
| 63,65                       | 56,40                                 | -11,4%     |



Fuente: elaboración propia

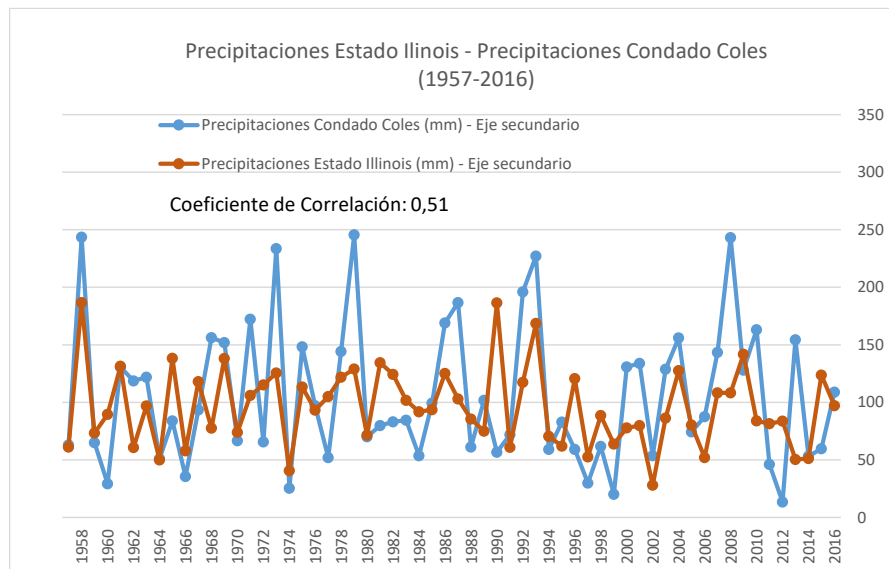
En este ejemplo, tanto en el periodo completo como en cada uno de los decenios, hubo una reducción en el desvío estándar que enfrentó el productor. El que mayor disminución evidenció fue el comprendido entre 1997-2006, donde el riesgo se redujo en 19% debido al uso del derivado. En el decenio 2007-2016, el desvío disminuyó un 1,6%. En el caso de maíz en Illinois, por lo tanto, el efecto del uso del derivado fue relativamente menor que en el caso de la soja en Iowa, pero no por ello dejó de ser efectivo.

El segundo interrogante al que trato de responder con mi trabajo tiene que ver con la utilidad del *put* de Illinois para mitigar el riesgo (desvío estándar) del productor local. A partir de la demostración de la reducción del desvío estándar realizada más arriba concluyo que, en el ejemplo, el productor del condado de Coles que se habría cubierto con una protección elaborada con información de precipitaciones y rindes de todo el estado, habría logrado reducir el riesgo (volatilidad) tanto de todo el período como de los sub-períodos de 10 años estudiados.

Para que el derivado cubra correctamente, debe existir una correlación entre la “base” y la zona geográfica en la cual se está utilizando.

En relación a ello, en el siguiente Gráfico 6, se puede observar la evolución de las lluvias tanto en el estado de Illinois como en el condado de Coles.

GRÁFICO 6

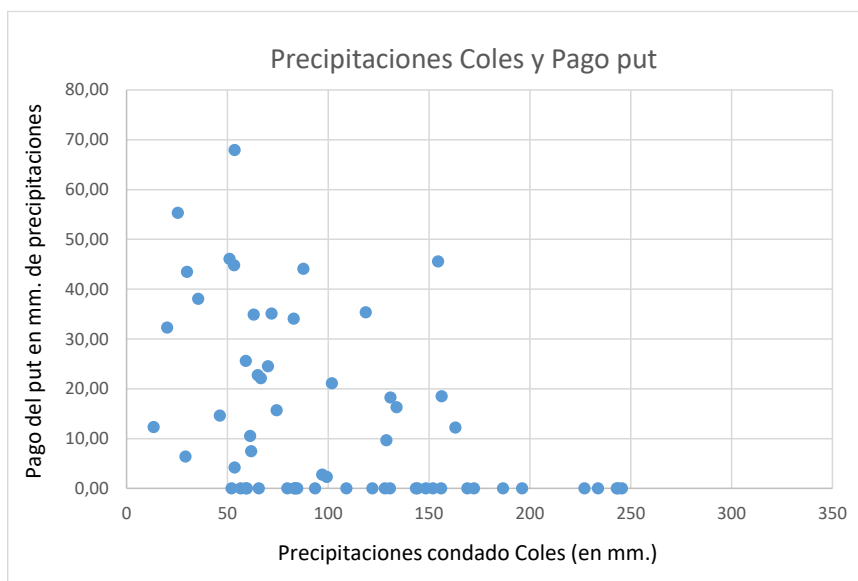


Fuente: elaboración propia

Se observa que las precipitaciones del condado de Coles muestran mayor volatilidad que las del estado de Illinois. De todos modos, la correlación entre las lluvias mensuales de julio es suficiente para permitir tomar la cobertura sin problemas en cuanto al cumplimiento de reducción del riesgo. El índice de correlación entre ambas series es de 0,51. Como se vio numéricamente, la variación a la baja en el riesgo fue menor en este caso que en el ejemplo de la soja (en donde la correlación entre la lluvia del condado y la del estado era más alta). Al igual que en aquel caso, puede suceder que haya años en los cuales el pago del derivado es necesario pero no se recibe; o se recibe pero no es necesario o, si bien se recibe, es menos de lo que sería necesario. De todos modos, el derivado con riesgo base geográfico cumplió con su objetivo de reducir el riesgo (redujo el desvío estándar) del productor agropecuario, tanto para el periodo de 60 años completo, como para todos los sub-periodos de 10 años estudiados.

En el Gráfico 7 presento el *scatter plot* que relaciona las precipitaciones del condado de Coles y el pago del *put* en milímetros de lluvia. Al igual que en el caso de la soja, la imagen muestra que a valores más bajos de precipitación en el condado corresponden valores más altos de pago del derivado. Como dije en el ejemplo anterior, aquí también se cumple una primera condición necesaria para que el derivado logre su objetivo, ya que paga más cuanto menores son las precipitaciones (también mostré que el pago suele ser mayor que el costo y que se reduce el riesgo medido en desvío estándar) y, en segundo lugar, que se puede utilizar el *put* valuado en Illinois para cubrir las lluvias del condado de Coles, siempre teniendo en cuenta que el riesgo base no desaparece pero se minimiza.

GRÁFICO 7



Fuente: elaboración propia

## 5. Conclusiones

El trabajo realizado tuvo el objetivo de responder al interrogante acerca de la utilidad de los derivados climáticos para mitigar el riesgo. En particular, el análisis se centró en opciones (*put*) sobre precipitaciones en dos zonas de Estados Unidos a ser utilizadas por el productor agrícola de soja y maíz.

En primer lugar, desarrollé el marco teórico de los instrumentos existentes, así como también la evolución histórica de los mismos. Posteriormente, y yendo al núcleo de la investigación, presenté un modelo de valuación de opciones para obtener el *fair value* y realizar un *testeo* hacia atrás, con el objetivo de determinar si la utilización del derivado le habría permitido al productor agrícola reducir el riesgo (desvío estándar). Específicamente, la comparación que hice fue entre la serie del negocio físico (sin cobertura) y la serie que comprendía el negocio físico más la cobertura (incluyendo el costo de la opción).

A continuación postulo las conclusiones obtenidas, centradas en diferentes cuestiones que hacen a un análisis completo de la situación estudiada:

- El *put* habría generado *payoff* bruto (habría pagado) en alrededor de la mitad de los años analizados. Esto indica que el *strike* elegido (promedio simple de los años en estudio), fue correcto.
- En relación al precio del *put*, el costo obtenido a partir de la valuación no significó un valor “exagerado”, en el sentido que en la gran mayoría de los casos, el beneficio obtenido por la cobertura fue superior al costo pagado.
- El resultado de la cobertura por sí sola no depende de las precipitaciones del condado en el cual se utiliza la misma, sino de las lluvias del estado en su conjunto en relación al *strike* elegido.
- El *payoff* neto se ve afectado, en última instancia, por el *strike*, que influye en los resultados por dos vías. Por un lado, afecta a la valuación, ya que a mayor *strike*, mayores son los hipotéticos pagos del *put* en relación a las precipitaciones simuladas. Una vez determinado el precio (costo), a mayor *strike*, mayor es el monto que cobrará el tomador de la cobertura, en caso de corresponder.
- En el agregado, a mayor *strike*, mayor es el *payoff* neto. Esto se debe a que el efecto de su suba tiene más impacto en el aumento del *payoff* bruto que en el incremento del costo.
- La utilización de la cobertura permitió reducir el desvío estándar del negocio físico. Es decir, cumplió con el objetivo de mitigar el riesgo del productor, tanto para el período completo como para los subperíodos de 10 años, con sólo una excepción.

Otra pregunta que quise responder en la investigación fue si la utilización de un derivado con riesgo base geográfico, es decir, valuado con datos de un estado completo, podía ser útil para reducir el riesgo de un campo dentro de un condado específico. Aquí las conclusiones al respecto:

- Aun con la existencia de riesgo base, los derivados estudiados permitieron la reducción en el riesgo para el período y sub-períodos analizados.
- El grado de efectividad de la opción depende de la correlación entre las precipitaciones del condado y el estado en su conjunto.
- A mayor correlación, se observó una disminución mayor en el desvío estándar del periodo en estudio.

En resumen, se pudo dar respuesta a ambos interrogantes planteados al inicio del trabajo, determinándose que los derivados analizados permitieron reducir el riesgo del productor agrícola de las zonas de Iowa e Illinois, y que el riesgo base no significó un problema a la hora de evaluar el correcto funcionamiento de los mismos.

## **6. Desafíos para Argentina**

Si bien la investigación fue realizada con ejemplos de zonas geográficas dentro de Estados Unidos, es muy interesante pensar en la posibilidad de la utilización de derivados climáticos en la Argentina, dado que considero que serían de gran utilidad para cumplir con su objetivo de mitigar riesgos, tal como he mostrado previamente.

En primera instancia, es necesario hacer énfasis en que tanto el mercado financiero local como la actividad agrícola, están actualmente atravesando un momento de expansión dadas las políticas adoptadas en favor de estos sectores. De todos modos, aun en el caso de que esto no ocurriera, el agro ha representado históricamente en este país una de las principales fuentes de riqueza tanto directa como indirectamente, puesto que además de generar valor, genera trabajo en muchas industrias relacionadas.

Lamentablemente, el concepto de cobertura no está muy desarrollado en la Argentina. Si uno observa el volumen transado tanto de futuros como de opciones, está claro que queda mucho camino por recorrer. Si bien existen mercados que podrían desarrollarse en ese sentido, como lo son la Bolsa de Cereales de Rosario y el Mercado a Término de Buenos Aires, hay condiciones locales que no son las óptimas aún para una mayor utilización de instrumentos de cobertura. Esto también está ligado a que los productores agropecuarios comprendan la necesidad de utilizar dichos mercados para suavizar sus flujos de caja y no quedar a merced de las condiciones climáticas, que no se pueden manejar.

Asimismo, la responsabilidad del desarrollo de los instrumentos estudiados también recae sobre diferentes actores. Uno de ellos son los mercados organizados, encargados de la existencia y oferta de los instrumentos, dado que al momento no existe un mercado desarrollado sobre derivados climáticos local, como sí ocurre en Estados Unidos o Europa. Por parte del Gobierno, correspondería para este fin la publicación de estadísticas más confiables y certeras con respecto a los índices que se pueden tomar como subyacente, a saber, precipitaciones, temperatura, nieve, etc. En este sentido, las estadísticas actuales no son buenas ni completas, lo que magnifica (como he comentado en este trabajo) el riesgo base de la cobertura. Corresponde también a los actores de mercado, ya sean productores que se cubren ante el evento climático o especuladores que buscan obtener retornos, otorgarle profundidad y volumen al intercambio de dichos instrumentos, de modo que dejen de ser un ejercicio teórico para tornarse en una realidad en Argentina. Agrego, por último, al sector bancario nacional, que podría cumplir un rol muy importante en el hecho de facilitar el abordaje de las garantías iniciales y los márgenes que requieren este tipo de instrumentos que, en algunos casos, pueden ser montos altos y difíciles de alcanzar.



El camino es compartido y llevará tiempo. Es sabido que la introducción de novedades no es fácil y requiere de aspectos no sólo económicos sino también legales y políticos. Aun así, a juzgar por los resultados obtenidos y la utilidad de estos instrumentos para reducir el riesgo y la volatilidad de las cosechas, considero que vale la pena tanto su estudio, en primer lugar, como su implementación en la realidad no sólo agrícola sino también de otras industrias que se verían altamente beneficiadas con su utilización.

### *Agradecimientos*

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Ph.D. Nicolás Merener, por su guía y consejos durante la realización del trabajo. Su aporte fue muy valioso tanto a la hora de encarar la investigación como al momento de resolver dudas puntuales durante el transcurso del mismo.

En segundo lugar, agradezco a todos aquellos que, de diferentes maneras, participaron en la realización de mi trabajo, ya sea desde la ayuda académica hasta los consejos y comentarios en las distintas secciones. Me refiero a Ing. Agr. Fernando Canosa, Lic. Magdalena Cornejo, Lic. Fernando Couto, Lic. Melina Dias Neiva, Lic. Darío Jelen, Ing. Agr. Cecilia Presa y Lic. Mark Schleusener.

Finalmente, agradezco el apoyo de mi familia en todo momento.

## 7. Referencias bibliográficas

- Cao, Melanie y Wei Jason. *Weather derivatives: Valuation and market Price of Weather Risk*.
- Carter, S. *Pricing Basket Temperature Derivatives*.
- Castro, Mariano. *Managing weather risk with rainfall option*.
- Chen, G. y Roberts, M.C. *Managing Dairy Profit Risk Using Weather Derivatives*.
- Considine, Geoffrey. *Introduction to weather derivatives*.
- Cruz, Juan Sergio y Llinás, Andrés. *Modelo Analítico de derivados de clima para eventos específicos de riesgo en la Agricultura en Colombia*.
- De Paz Cobo, Sonia. *Derivados vinculados al seguro*.
- Donzelli, Maximiliano. *Financiamiento de empresas argentinas 2015-2016 en los mercados internacionales ¿es una opción los bonos callable?*
- Finas, B. *The transfer of weather risk faced with the challenges of the future*.
- Geysler, J.M. *Weather derivatives. Concept and application for their use in South Africa*.
- Gray, Simon *et al.* *Ensayo Derivados financieros*.
- Henríquez Vega, Patricio. *Derivados Climáticos: Valorización de opciones sobre precipitaciones*.
- Hernández Arango, José Miguel. *Contratos financieros derivados del clima como estrategia de cobertura en Colombia. Aplicación a una central de generación hidroeléctrica*.
- Hull, John. *Introducción a los mercados de futuros y opciones*.
- Mascareñas, Juan. *Opciones I: Introducción*.
- Merener, Nicolás. *Globally Distributed Production and the Pricing of CME Commodity Futures*.
- Merener, Nicolás y Steglich, Eugenia. *Output Value Risk for Commodity Producers: the Uncertain Benefits of Diversification*.
- Mussio, Verónica. *Derivados Climáticos aplicados a la agricultura*.
- Rodríguez Tablado, Luis Ángel. *Derivados climáticos*.
- Sapag Chain, N. *Proyectos de inversión. Formulación y evaluación*.
- Strata, J.E. *Administración del riesgo: seguro para el sector agrícola en la Argentina*. Bolsa de comercio de Rosario.
- Tannura, Michael y Irwin, Scott. *Weather, Technology, and Corn and Soybean Yields in the U.S. Corn Belt*.
- Utrera, L. *Las últimas innovaciones de la industria de derivados. Futuros exóticos*. Bolsa de comercio de Rosario. Lecturas 2004.
- Vedenov, D. y Barnett, B. *Efficiency of weather derivatives as primary crop insurance*.

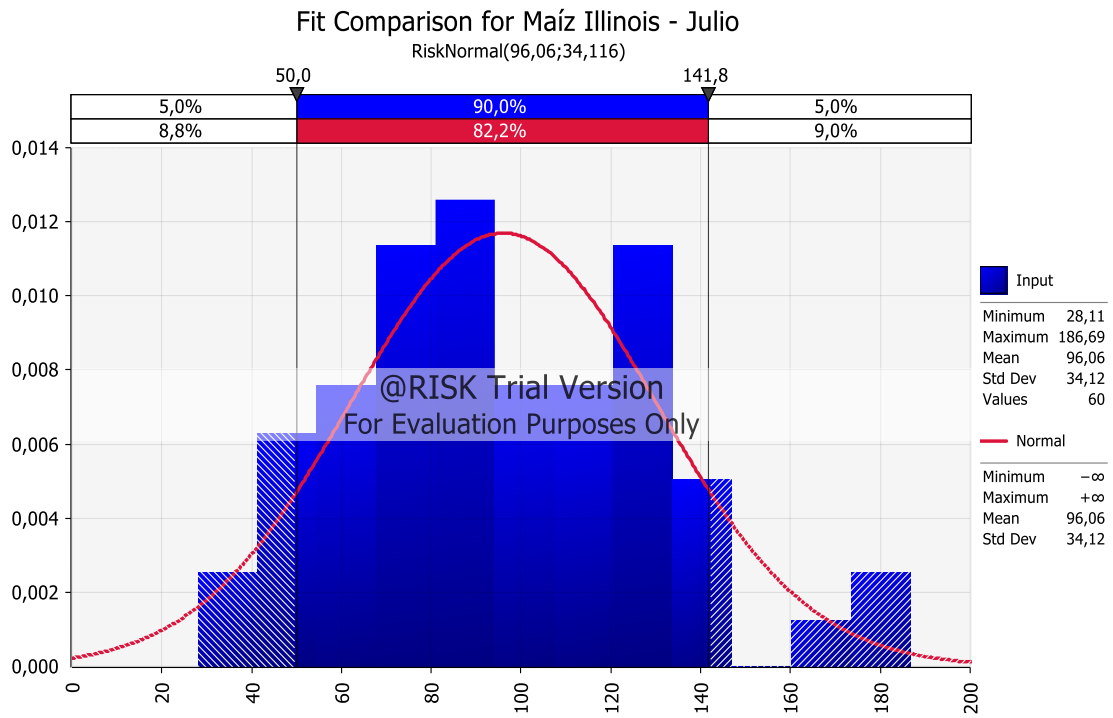
## Sitios web

- <http://www.weather.gov/climate/xmacis.php?wfo=lot>
- <http://coas.siu.edu/research/university-farms-forest-research/belleville-center.html>
- <https://quickstats.nass.usda.gov/>
- <http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/c/iswsc-123.pdf>
- <http://www.investopedia.com/terms/b/basisrisk.asp>
- [https://www.cmegroup.com/education/files/Weather\\_Derivatives\\_Markets\\_at\\_CME\\_Group.pdf](https://www.cmegroup.com/education/files/Weather_Derivatives_Markets_at_CME_Group.pdf)
- <http://www.cmegroup.com/trading/weather/>
- <https://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ag452-4.html>
- <http://wrma.org/weather-risk-by-application/agriculture/>
- <http://www.investopedia.com/walkthrough/corporate-finance/4/return-risk/arbitrage-pricing.aspx>

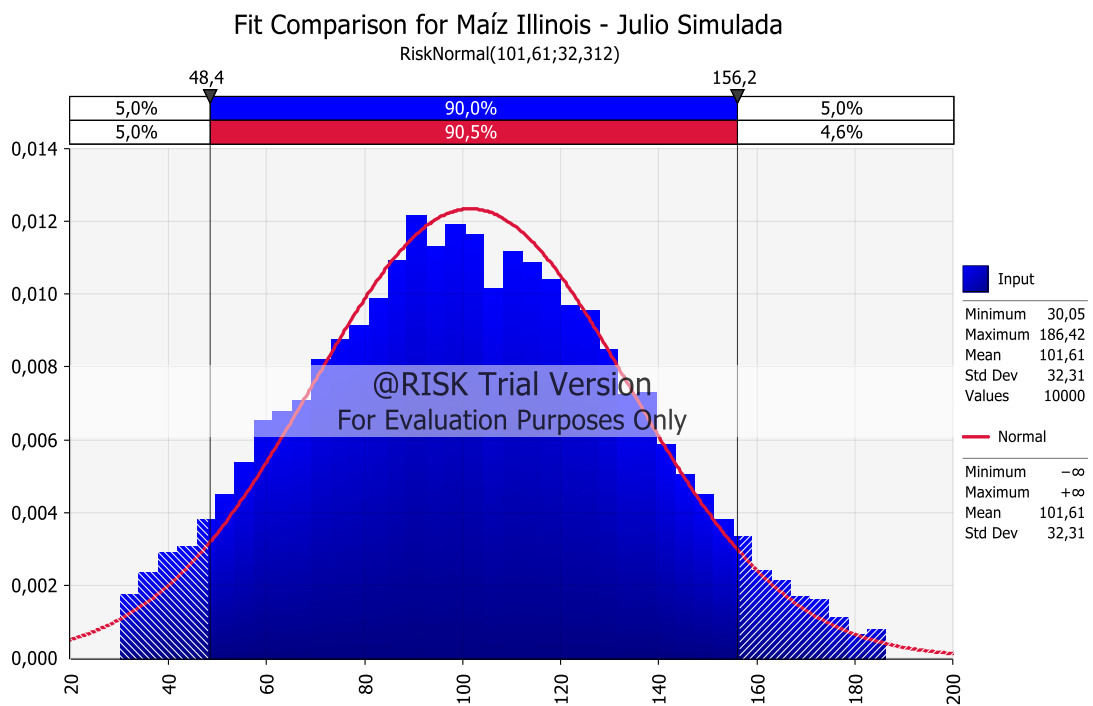
8. Apéndices

APÉNDICE 1

Maíz Illinois Julio

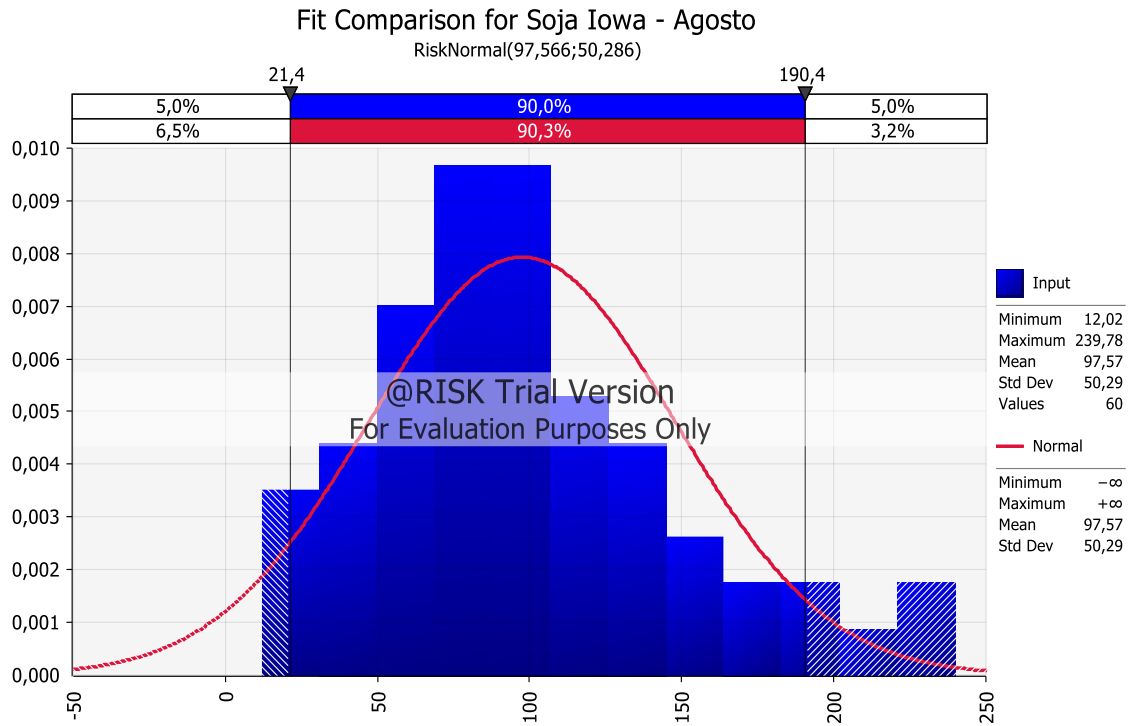


Fuente: elaboración propia con paquete estadístico @Risk

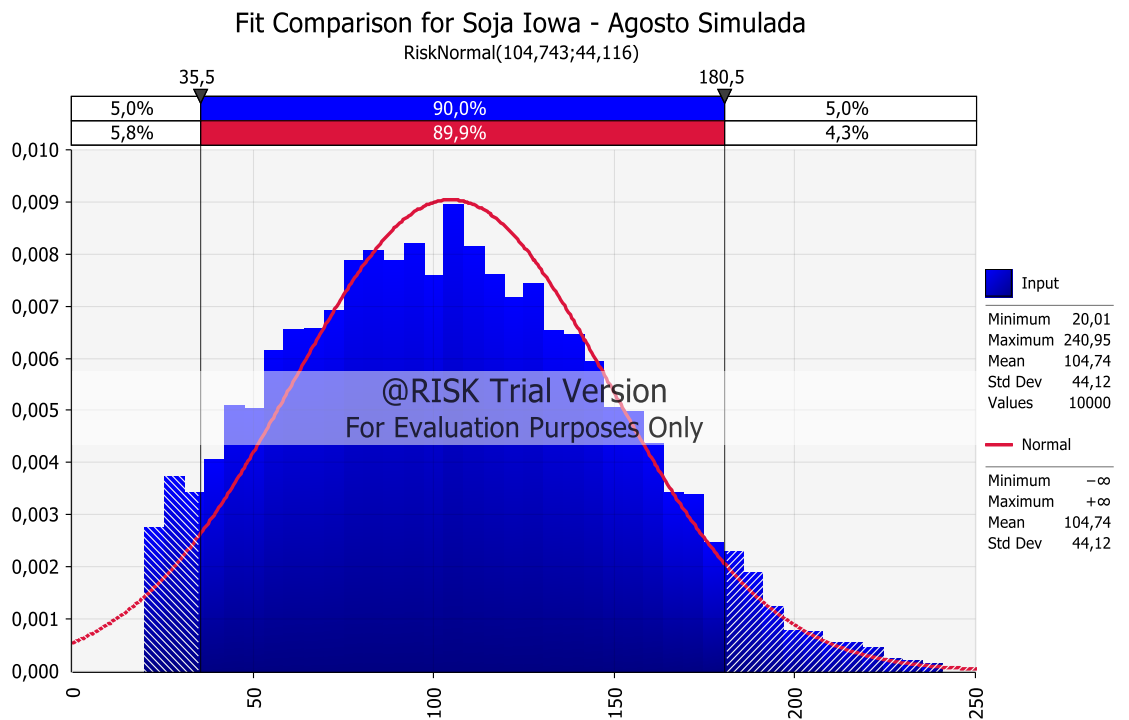


Fuente: elaboración propia con paquete estadístico @Risk

Soja Iowa Agosto



Fuente: elaboración propia con paquete estadístico @Risk



Fuente: elaboración propia con paquete estadístico @Risk

## APÉNDICE 2

Maíz Illinois Julio

**Bondad de Ajuste Normal****Kolmogorov-Smirnov**

|                |         |         |         |         |         |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sample Size    |         |         |         |         | 60      |
| Statistic      |         |         |         |         | 0,06191 |
| P-Value        |         |         |         |         | 0,96461 |
| $\alpha$       | 0,2     | 0,1     | 0,05    | 0,02    | 0,01    |
| Critical Value | 0,13573 | 0,15511 | 0,17231 | 0,19267 | 0,20673 |
| Reject?        | No      | No      | No      | No      | No      |

**Anderson-Darling**

|                |        |        |        |        |         |
|----------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Sample Size    |        |        |        |        | 60      |
| Statistic      |        |        |        |        | 0,38642 |
| $\alpha$       | 0,2    | 0,1    | 0,05   | 0,02   | 0,01    |
| Critical Value | 1,3749 | 1,9286 | 2,5018 | 3,2892 | 3,9074  |
| Reject?        | No     | No     | No     | No     | No      |

**Chi-Squared**

|                 |        |        |       |        |         |
|-----------------|--------|--------|-------|--------|---------|
| Deg. of freedom |        |        |       |        | 5       |
| Statistic       |        |        |       |        | 1,6048  |
| P-Value         |        |        |       |        | 0,90066 |
| $\alpha$        | 0,2    | 0,1    | 0,05  | 0,02   | 0,01    |
| Critical Value  | 7,2893 | 9,2364 | 11,07 | 13,388 | 15,086  |
| Reject?         | No     | No     | No    | No     | No      |

Fuente: elaboración propia con paquete estadístico EasyFit

Soja Iowa Agosto

**Bondad de Ajuste Normal****Kolmogorov-Smirnov**

|                |         |         |         |         |         |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sample Size    |         |         |         |         | 60      |
| Statistic      |         |         |         |         | 0,11099 |
| P-Value        |         |         |         |         | 0,42026 |
| $\alpha$       | 0,2     | 0,1     | 0,05    | 0,02    | 0,01    |
| Critical Value | 0,13573 | 0,15511 | 0,17231 | 0,19267 | 0,20673 |
| Reject?        | No      | No      | No      | No      | No      |

**Anderson-Darling**

|                |        |        |        |        |         |
|----------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Sample Size    |        |        |        |        | 60      |
| Statistic      |        |        |        |        | 0,88786 |
| $\alpha$       | 0,2    | 0,1    | 0,05   | 0,02   | 0,01    |
| Critical Value | 1,3749 | 1,9286 | 2,5018 | 3,2892 | 3,9074  |
| Reject?        | No     | No     | No     | No     | No      |

**Chi-Squared**

|                 |        |        |       |        |         |
|-----------------|--------|--------|-------|--------|---------|
| Deg. of freedom |        |        |       |        | 5       |
| Statistic       |        |        |       |        | 3,5328  |
| P-Value         |        |        |       |        | 0,61843 |
| $\alpha$        | 0,2    | 0,1    | 0,05  | 0,02   | 0,01    |
| Critical Value  | 7,2893 | 9,2364 | 11,07 | 13,388 | 15,086  |
| Reject?         | No     | No     | No    | No     | No      |

Fuente: elaboración propia con paquete estadístico EasyFit

## APÉNDICE 3

## Maíz Illinois Julio

| <i>Estadísticas de la regresión</i>          |                   |
|--|-------------------|
| Coefficiente de correlación múltiple         | 0,88971256        |
| Coefficiente de determinación R <sup>2</sup> | <b>0,79158844</b> |
| R <sup>2</sup> ajustado                      | 0,78427576        |
| Error típico                                 | 1,03936612        |
| Observaciones                                | 60                |

|                | <i>Estadístico</i>   |                     |                   |                |
|----------------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------|
|                | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>t</i>          | <i>P-Value</i> |
|                | -                    |                     | -                 |                |
| B <sub>0</sub> | 222,245801           | 15,6299406          | 14,2192352        | 2,13034E-20    |
| B <sub>1</sub> | 0,11529487           | 0,0078364           | 14,7127243        | 4,58886E-21    |
| B <sub>2</sub> | 0,00955878           | 0,00401153          | <b>2,38282605</b> | 0,020537056    |

## Soja Iowa Agosto

| <i>Estadísticas de la regresión</i>          |                   |
|--|-------------------|
| Coefficiente de correlación múltiple         | 0,91802308        |
| Coefficiente de determinación R <sup>2</sup> | <b>0,84276638</b> |
| R <sup>2</sup> ajustado                      | 0,83743642        |
| Error típico                                 | 0,25692276        |
| Observaciones                                | 60                |

|                | <i>Estadístico</i>   |                     |                   |                |
|----------------|----------------------|---------------------|-------------------|----------------|
|                | <i>Coefficientes</i> | <i>Error típico</i> | <i>t</i>          | <i>P-Value</i> |
|                | -                    |                     | -                 |                |
| B <sub>0</sub> | 59,7960233           | 3,68722891          | 16,2170629        | 2,0687E-23     |
| B <sub>1</sub> | 0,03134931           | 0,00186338          | 16,8239258        | 3,4595E-24     |
| B <sub>2</sub> | 0,00144426           | 0,00066625          | <b>2,16774601</b> | 0,03422438     |



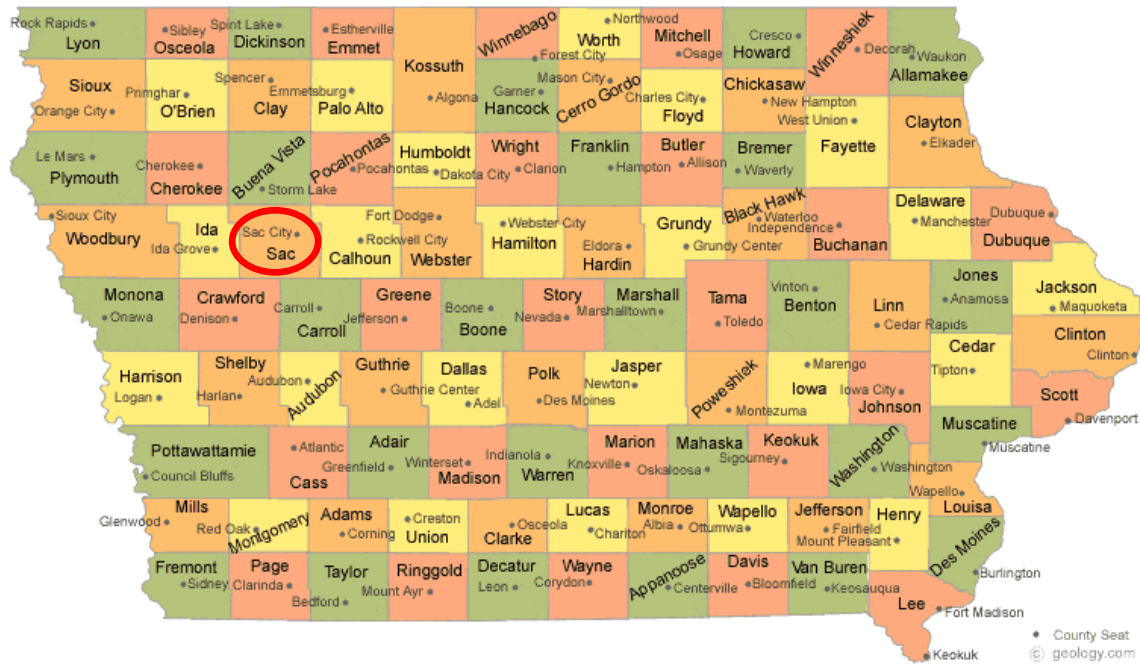
APÉNDICE 4

Estado de Illinois



Fuente: Geology.com

Estado de Iowa



Fuente: Geology.com

## APÉNDICE 5

## Maíz Illinois Julio

| Año  | Lluvia Condado (mm.) | Lluvia Estado (mm.) | Rinde Estado (ton/ha) |
|------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 2016 | 108,966              | 97,11               | 12,37                 |
| 2015 | 59,69                | 123,70              | 10,98                 |
| 2014 | 53,34                | 51,22               | 12,55                 |
| 2013 | 154,432              | 50,46               | 11,17                 |
| 2012 | 13,462               | 83,74               | 6,59                  |
| 2011 | 46,228               | 81,45               | 9,85                  |
| 2010 | 163,068              | 83,82               | 9,85                  |
| 2009 | 128,016              | 141,82              | 10,92                 |
| 2008 | 243,078              | 108,20              | 11,24                 |
| 2007 | 143,51               | 108,37              | 10,98                 |
| 2006 | 87,63                | 51,99               | 10,23                 |
| 2005 | 74,422               | 80,35               | 8,98                  |
| 2004 | 155,956              | 127,68              | 11,30                 |
| 2003 | 128,778              | 86,36               | 10,29                 |
| 2002 | 53,594               | 28,11               | 8,47                  |
| 2001 | 133,858              | 79,76               | 9,54                  |
| 2000 | 130,81               | 77,81               | 9,48                  |
| 1999 | 20,066               | 63,75               | 8,79                  |
| 1998 | 61,722               | 88,56               | 8,85                  |
| 1997 | 29,972               | 52,58               | 8,10                  |
| 1996 | 59,182               | 120,73              | 8,54                  |
| 1995 | 82,804               | 61,98               | 7,09                  |
| 1994 | 59,182               | 70,44               | 9,79                  |
| 1993 | 227,076              | 168,57              | 8,16                  |
| 1992 | 196,088              | 117,43              | 9,35                  |
| 1991 | 71,882               | 60,96               | 6,72                  |
| 1990 | 56,642               | 186,52              | 7,97                  |
| 1989 | 101,854              | 74,93               | 7,72                  |
| 1988 | 61,214               | 85,51               | 4,58                  |
| 1987 | 186,69               | 102,95              | 8,29                  |
| 1986 | 168,91               | 125,22              | 8,47                  |
| 1985 | 99,314               | 93,73               | 8,47                  |
| 1984 | 53,594               | 91,86               | 7,16                  |
| 1983 | 84,582               | 101,68              | 4,96                  |
| 1982 | 83,058               | 124,38              | 8,22                  |
| 1981 | 79,756               | 134,45              | 7,91                  |
| 1980 | 70,104               | 71,54               | 5,84                  |
| 1979 | 245,618              | 129,03              | 7,97                  |
| 1978 | 144,272              | 121,92              | 6,97                  |
| 1977 | 52,07                | 105,07              | 6,59                  |
| 1976 | 97,028               | 93,30               | 6,72                  |
| 1975 | 148,336              | 113,37              | 7,28                  |
| 1974 | 25,4                 | 40,72               | 5,15                  |
| 1973 | 233,68               | 125,65              | 6,46                  |
| 1972 | 65,532               | 115,23              | 6,90                  |
| 1971 | 172,212              | 106,00              | 6,65                  |
| 1970 | 66,548               | 73,91               | 4,64                  |
| 1969 | 151,892              | 138,09              | 6,40                  |
| 1968 | 156,21               | 77,55               | 5,65                  |
| 1967 | 93,472               | 117,94              | 6,53                  |
| 1966 | 35,56                | 58,00               | 5,15                  |
| 1965 | 83,82                | 138,26              | 5,90                  |
| 1964 | 51,054               | 49,95               | 5,02                  |
| 1963 | 121,92               | 96,94               | 5,46                  |
| 1962 | 118,618              | 60,71               | 5,34                  |
| 1961 | 130,556              | 131,40              | 4,96                  |
| 1960 | 29,21                | 89,66               | 4,27                  |
| 1959 | 65,024               | 73,32               | 4,21                  |
| 1958 | 243,586              | 186,69              | 4,33                  |
| 1957 | 62,992               | 61,13               | 4,02                  |

Fuente: elaboración propia en base a datos de USDA y NOAA

## Soja Iowa Agosto

| Año  | Lluvia Condado (mm.) | Lluvia Estado (mm.) | Rinde Estado (ton/ha) |
|------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 2016 | 107,696              | 134,70              | 4,07                  |
| 2015 | 199,39               | 133,52              | 3,80                  |
| 2014 | 145,796              | 202,95              | 3,43                  |
| 2013 | 17,78                | 51,22               | 3,06                  |
| 2012 | 57,15                | 46,57               | 3,03                  |
| 2011 | 107,696              | 75,52               | 3,46                  |
| 2010 | 158,242              | 175,34              | 3,43                  |
| 2009 | 61,468               | 111,51              | 3,43                  |
| 2008 | 41,402               | 52,32               | 3,13                  |
| 2007 | 334,01               | 224,03              | 3,50                  |
| 2006 | 154,94               | 131,32              | 3,40                  |
| 2005 | 58,42                | 47,24               | 3,53                  |
| 2004 | 63,246               | 88,31               | 3,30                  |
| 2003 | 7,112                | 21,42               | 2,19                  |
| 2002 | 286,004              | 129,88              | 3,23                  |
| 2001 | 145,542              | 70,87               | 2,96                  |
| 2000 | 61,214               | 42,67               | 2,93                  |
| 1999 | 45,974               | 113,71              | 2,99                  |
| 1998 | 130,556              | 166,96              | 3,23                  |
| 1997 | 19,812               | 66,55               | 3,09                  |
| 1996 | 61,341               | 76,20               | 2,96                  |
| 1995 | 102,87               | 67,90               | 2,96                  |
| 1994 | 139,446              | 115,99              | 3,40                  |
| 1993 | 164,592              | 239,78              | 2,08                  |
| 1992 | 47,498               | 74,76               | 2,96                  |
| 1991 | 73,914               | 90,59               | 2,72                  |
| 1990 | 120,142              | 71,04               | 2,79                  |
| 1989 | 38,608               | 92,03               | 2,62                  |
| 1988 | 153,416              | 96,18               | 2,08                  |
| 1987 | 172,466              | 190,42              | 2,93                  |
| 1986 | 142,24               | 73,24               | 2,79                  |
| 1985 | 119,38               | 90,93               | 2,56                  |
| 1984 | 15,24                | 12,02               | 2,12                  |
| 1983 | 70,358               | 46,31               | 2,35                  |
| 1982 | 112,776              | 85,34               | 2,45                  |
| 1981 | 120,65               | 103,04              | 2,69                  |
| 1980 | 177,8                | 154,94              | 2,59                  |
| 1979 | 99,822               | 141,22              | 2,52                  |
| 1978 | 106,172              | 92,71               | 2,52                  |
| 1977 | 155,448              | 183,39              | 2,39                  |
| 1976 | 10,16                | 27,43               | 2,08                  |
| 1975 | 83,566               | 159,34              | 2,29                  |
| 1974 | 146,304              | 75,78               | 1,88                  |
| 1973 | 45,212               | 43,52               | 2,29                  |
| 1972 | 101,346              | 105,41              | 2,42                  |
| 1971 | 37,084               | 20,15               | 2,19                  |
| 1970 | 57,404               | 58,84               | 2,19                  |
| 1969 | 31,75                | 70,10               | 2,19                  |
| 1968 | 129,032              | 115,49              | 2,15                  |
| 1967 | 82,296               | 51,56               | 1,85                  |
| 1966 | 81,534               | 109,56              | 1,98                  |
| 1965 | 66,548               | 91,95               | 1,75                  |
| 1964 | 84,328               | 119,80              | 1,92                  |
| 1963 | 71,882               | 103,21              | 2,05                  |
| 1962 | 241,554              | 67,56               | 1,85                  |
| 1961 | 51,562               | 95,50               | 1,92                  |
| 1960 | 144,272              | 149,69              | 1,71                  |
| 1959 | 61,722               | 69,09               | 1,78                  |
| 1958 | 16,256               | 50,88               | 1,71                  |
| 1957 | 69,85                | 84,41               | 1,82                  |

Fuente: elaboración propia en base a datos de USDA y NOAA