

## METODOLOGÍA DE DECISIONES ROBUSTAS APLICADA A SISTEMAS AGROPECUARIOS. ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES

HORACIO ROJO<sup>1</sup> - SILVIA ADRIANA RAMOS<sup>2</sup> - XAVIER GONZÁLEZ<sup>3</sup> -  
LEANDRO RASPA<sup>4</sup> - ALEJANDRO WAINSTOCK<sup>4</sup> - DARÍO KALMUS<sup>4</sup>

Grupo Interdisciplinario Decisiones Sistemas Agrícolas (GIDESA),  
Facultades de Agronomía e Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina

hrojo38@hotmail.com, silviaadrianaramos@gmail.com,  
xaviering@gmail.com, leandrinor@gmail.com,  
alewain@gmail.com, darokalmus@gmail.com

**Resumen.** El objetivo principal del artículo es realizar un análisis de las vulnerabilidades sobre el conjunto inicial de estrategias dentro de una metodología de Decisiones Robustas aplicada en un sistema de producción agrícola. El presente trabajo detalla este aspecto dentro del marco de un proyecto de investigación en el cual se desarrolla en profundidad la temática de las Decisiones Robustas aplicadas a la toma de decisiones de los productores agrícola. Un objetivo secundario es presentar la Metodología de las Decisiones Robustas en un ámbito educativo para que sus resultados puedan ser reproducidos en otros campos de aplicación.

**Palabras Clave.** Decisiones Robustas, Producción Agrícola, Educación.

**Abstract.** The main objective of the paper is to analyze the vulnerabilities of the initial set of strategies within a Robust Decisions methodology applicable in an agricultural production system. This study details the step of deeply analyzing vulnerabilities within a wider research project in which the Robust Decision Making methodology is analyzed for decision making in agriculture field. A secondary objective is to present the Robust Decision Making methodology from an

---

<sup>1</sup> Profesor Consulto y director del grupo de investigación GIDESA (FAUBA-FIUBA)

<sup>2</sup> Profesora Adjunta e integrante del grupo de investigación GIDESA (FAUBA-FIUBA)

<sup>3</sup> Ayudante de 1° e integrante del grupo de investigación GIDESA (FAUBA-FIUBA)

<sup>4</sup> Integrante del grupo de investigación GIDESA (FAUBA-FIUBA)

educational point of view so that anyone will be able to reproduce the results in other field.

**Keywords.** Robust Decisions, Agricultural Production, Education.

## 1 INTRODUCCIÓN

Ante la necesidad de resolver un problema real es habitual que el responsable de la toma de decisión aspire a encontrar la mejor de las soluciones factibles, es decir, la solución óptima. En esa línea, los modelos y métodos disponibles de optimización le brindan la posibilidad de identificar soluciones óptimas exactas y tomar decisiones en función de ellas.

Sin embargo, un factor que dificulta la búsqueda de buenas soluciones es la presencia de incertidumbre en una situación real. Surge entonces el concepto de 'robustez' como criterio para poder identificar alternativas decisorias en esas situaciones y generar las denominadas Decisiones Robustas (DR) que permiten acotar el riesgo.

Existe buena y actualizada bibliografía que ha tratado con profundidad el tema de DR, como Bert et al (2006), Bert et al (2007), Bryant et al (2010), González (2012), Kasprzyk et al (2013), Lempert et al (2006), Lempert et al (2007), Lempert et al (2010), Letson et al (2008), Stakhiv (2011) y Ullman (2006), en los cuales se abordaron diversas situaciones de la realidad bajo condiciones de incertidumbre.

En particular, la problemática que se trata en el presente artículo es la de la producción agrícola en lo referente a la asignación del uso de tierras entre diferentes actividades agrícolas. El tema ha sido tratado como presentación inicial en González (2012), en el cual se expresa que "los sistemas productivos agrícolas son sistemas complejos en los cuales el resultado final depende de muchos factores de los que se desconoce su estado futuro" y por ello se considera necesario explorar para el ámbito agrícola "la utilización de una metodología diferente a la tradicional" como lo es "la metodología de las DR, en las que ya no importa tanto cuál es la mejor solución, en términos de valor esperado, sino más bien una solución aceptable para cualquier contexto posible". En el mismo artículo se indican los pasos previstos a seguir en la aplicación de la metodología de las DR al problema de producción agrícola elegido y en Rojo et al (2013) se describen en detalle los pasos iniciales de la metodología, extendiendo el alcance del trabajo al área didáctica de Educación. El presente artículo continúa esa línea de trabajo, describiendo los pasos siguientes.

El artículo está estructurado como se indica a continuación: en la segunda sección se incluye un resumen de la metodología de DR, en la tercera se comentan brevemente los pasos I a V de la metodología, en la cuarta se desarrollan en detalle los pasos VI a VIII de la metodología, en la quinta se comentan los resultados obtenidos y los próximos pasos que se prevé seguir en el corto plazo, en la sexta se incluyen las tablas y figuras y en la séptima se consignan las referencias bibliográficas utilizadas.

Este artículo integra el Proyecto Interdisciplinario FAUBA - FIUBA que se encuentra acreditado por la Universidad de Buenos Aires con el código 2062 0110 2000 16, dentro de la Convocatoria UBACyT para el periodo 2012-2014, proyecto al cual pertenecen los autores.

## 2 METODOLOGÍA DE DECISIONES ROBUSTAS

El marco teórico del proyecto lo brinda la formulación matemática de la Optimización Robusta (Mulvey et al 1995), la cual permite abordar problemas con incertidumbre en los que se desconoce la distribución estadística de los datos. Una característica básica de esta formulación es que los datos son representados mediante un conjunto de escenarios en lugar de trabajar con estimaciones de ellos o recurrir al análisis de sensibilidad clásico.

A partir de la Optimización Robusta se pueden reconocer varios enfoques derivados y el seguido en el presente trabajo lo constituye la denominada metodología de las DR (MDR) propuesta en Lempert (2006), cuya aplicación al caso de la producción agropecuaria fuera expuesta en detalle en González (2012) y de la cual en esta sección se presenta una síntesis. En trabajos posteriores se prevé extender el análisis del problema a otros enfoques de la Optimización Robusta.

En el proceso de toma de decisiones dentro de un marco de incertidumbre y con la MDR, el decisor debe seleccionar una estrategia (Si) entre un conjunto de estrategias posibles (S), las cuales producen resultados que son función de factores de estado del contexto sobre los que no se tiene certeza. Estos factores definen un conjunto de escenarios considerados (F) donde cada escenario (Fj) está determinado por una combinación de estados que aportan incertidumbre sobre el resultado final.

Definidos los escenarios F y las estrategias S, en la MDR se deben evaluar todas las combinaciones de elementos entre esos dos conjuntos  $E = S \times F$  y seguir el procedimiento propuesto por Lempert (2007), definido como “un procedimiento de decisión analítico e iterativo que ayuda a identificar estrategias robustas candidatas, caracterizar sus vulnerabilidades y evaluar otras alternativas que sean más sólidas cuando las candidatas sean vulnerables”.

Los pasos metodológicos a seguir en el procedimiento son los siguientes:

- I. Seleccionar un subconjunto de **estrategias** posibles (S).
- II. Determinar todos los **escenarios** factibles de considerar (F).
- III. Especificar los diferentes **modelos descriptivos de performance** y los valores de los parámetros a tomarse y luego adoptar un modelo.
- IV. **Evaluar** todas las combinaciones de estrategias y escenarios conforme el modelo adoptado, obteniendo un resultado para cada combinación (E).
- V. De acuerdo a esa evaluación, proponer **estrategias robustas candidatas iniciales** considerando todos los escenarios.

- VI. Delimitar un subconjunto de escenarios en los cuales las estrategias candidatas presentan **vulnerabilidades** pues no tienen buen desempeño y originan pérdida de performance o **Regret** respecto a la performance de la mejor estrategia en esos escenarios.
- VII. Identificar un subconjunto de **estrategias** que pertenecen a la frontera **con mejor performance** entre los escenarios identificados en el paso anterior y los demás escenarios.
- VIII. Caracterizar la conveniencia de adoptar una estrategia de cobertura de acuerdo a un análisis de sus **vulnerabilidades**.
- IX. Identificar un nuevo subconjunto de **estrategias robustas candidatas** que mejore el cubrimiento en los escenarios vulnerables e iterar desde el paso V hasta haber analizado todas las estrategias que resulten del análisis.

En el artículo Rojo et al (2013) se han desarrollado en detalle los pasos I a V de la MDR mientras que en el presente artículo se propone presentar en detalle los puntos VI a VIII de la MDR y en un próximo trabajo se prevé desarrollar el paso IX.

### 3 EL CASO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA. PASOS I a V

La parte descriptiva de estos pasos está desarrollada en el capítulo 3 de González (2012) y en esta sección se propone complementarlo brindando mayor detalle en el procedimiento de cálculo.

#### 3.1 Definición de las estrategias

La decisión del productor pasa por la selección de alternativas de producción expresadas en términos de Cultivo (semillas de maíz, soja, combinado doble soja-trigo, por ejemplo) y su Manejo (fecha de siembra, distancia entre filas y cantidad de fertilizante). Originalmente el grupo planteó 20 alternativas de Cultivo-Manejo (CM), pero resultados preliminares obtenidos, junto con información de los miembros del grupo de la Facultad de Agronomía, llevaron a reducir las alternativas a las 6 planteadas en González (2012) y que a continuación detallamos: CM<sub>1</sub> –sólo maíz del identificador 4 Ma4–; CM<sub>2</sub> –sólo maíz del identificador 5 Ma5–; CM<sub>3</sub> –sólo soja del identificador 1 So1–; CM<sub>4</sub> –sólo soja del identificador 6 So6–; CM<sub>5</sub> –combinado de soja y trigo con identificadores 3 SW3–; CM<sub>6</sub> –combinado de soja y trigo con identificadores 6 SW6–.

Como a cada terreno se lo considera divisible en 6 unidades, las estrategias a evaluar en los escenarios resultan de las combinaciones de asignación de los 6 CM<sub>c</sub> entre las 6 partes del campo, surgiendo así 462 estrategias posibles, las que se encuentran parcialmente desarrolladas en la Tabla 1 mediante fracciones  $x_k$  de 1, siendo  $x_k$  la proporción de terreno a asignar a cada CM<sub>c</sub> en el escenario futuro. En Rojo et al (2013) se encuentran detalladas las 462 estrategias consideradas.

### 3.2 Definición de los escenarios considerados

Una vez que el productor decide una estrategia, para cada  $CM_c$  –de acuerdo a la proporción de terreno asignada según la Tabla 1– obtendrá un ingreso monetario al final del ejercicio que será función del precio de venta en USD/Ton de cada  $CM_c$  y del rendimiento en Ton/Ha para cada  $CM_c$ , rendimiento que a su vez depende de las condiciones climáticas imperantes. Estos dos factores (Condiciones Climáticas y Nivel de Precios) son los que aportan incertidumbre al modelo y configuran los escenarios a considerar.

Las condiciones climáticas se incorporan simulando los rendimientos mediante modelos agronómicos específicos de simulación de crecimiento de cultivo (Jones et al 1998 - Podestá et al 2008). Dichos modelos son alimentados con información climática histórica diaria junto con las características de los  $CM_c$  y devuelven rendimientos en Ton/Ha del cultivo.

En la Tabla 2 se ve parte de una serie histórica de precios de los  $CM_c$  para el período 1983-2009 y en la Tabla 3 parte de la simulación de rendimientos de los  $CM_c$  para el período 1931-2007 en función de información climática histórica. En Rojo et al (2013) se puede apreciar la serie histórica de precios y los resultados de la simulación para los períodos completos. Los escenarios totales a considerar son una combinación de un año histórico de precios con un año histórico de rendimientos. Considerando 27 años de precios (1983-2009) y 77 años de rendimientos (1931-2007), su producto resulta en un total de  $27 * 77 = 2079$  escenarios a considerar.

Al ser insignificante el volumen de producción de cultivos de la zona de Pergamino en comparación con la producción mundial, es esperable que las condiciones climáticas de la zona en cuestión no afecten, o afecten casi imperceptiblemente, a los precios internacionales que se forman en base a los stocks mundiales y la demanda. Se puede probar la inexistencia de correlación entre las precipitaciones de la zona de Pergamino y el precio internacional de la soja. Por ejemplo, para la misma campaña, si tomamos las series para los años 1983 al 2007 de las precipitaciones y de los precios en dólares de la soja, vemos que la correlación es muy baja y negativa utilizando el índice de Pearson ( $R = -0.266$ ), lo que verifica la no correlación entre las variables.

Es por esto que las series históricas de datos climáticos y las series históricas de precios se combinan entre sí sin guardar una relación unívoca para generar los escenarios a ensayar.

### 3.3 Ingreso Bruto de cada $CM_c$

Dado un  $CM_c$  con  $c = 1$  a  $6$ , para un nivel de precios de un año  $m$  y un rendimiento según condiciones climáticas de un año  $n$ , el Ingreso Bruto en USD/Ha que percibe el productor para cada  $CM_c$  es:

$$\text{Ingreso Bruto } CM_c(m,n) = \text{Precio } CM_c(m) * \text{Rendimiento } CM_c(n)$$

con:  $c = 1$  a  $6$ ;  $m = 1$  (1983) a  $27$  (2009);  $n = 1$  (1931) a  $77$  (2007)

Para los interesados en reproducir el procedimiento de cálculo, en la Tabla 4 se indican 8 valores de Ingresos de los CM<sub>c</sub> (m,n), en USD/Ha, ordenados sobre una matriz de 2079 filas (cantidad de escenarios) y 8 columnas (4 CM<sub>c</sub> simples y 4 columnas correspondientes a cada una de las 2 partes que integran cada uno de los 2 CM<sub>c</sub> combinados).

### 3.4 Margen de cada CM<sub>c</sub>

El productor debe asumir costos fijos directos, costos variables y costos de estructura, todos en USD/Ha. Los costos fijos CFCM<sub>c</sub> dependen del CM<sub>c</sub> y corresponden al costo de las semillas, al costo de los agroquímicos y al costo de la labor para la siembra. Los costos variables CVCM<sub>c</sub> dependen directamente del rendimiento de la producción del CM<sub>c</sub> e incluyen el costo de cosecha, el costo de transporte y el costo de comercialización, mediante un costo unitario adimensional CVuCM<sub>c</sub>. Los costos de estructura CECM<sub>c</sub> consideran el alquiler del terreno y el asesoramiento técnico. Los costos CFCM<sub>c</sub>, CVuCM<sub>c</sub> y CECM<sub>c</sub> se indican en la Tabla 5.

El Margen Neto, en USD/Ha, que obtiene el productor de cada CM<sub>c</sub> se calcula descontando los costos al Ingreso Bruto. Para los 4 CM<sub>c</sub> simples (Ma4, Ma5, So3 y So6) el margen neto, en USD/Ha, queda expresado por:

$$\text{Margen Neto CM}_c(m,n) = \text{Ingreso CM}_c(m,n) * (1 - \text{CVuCM}_c) - \text{CFCM}_c - \text{CECM}_c$$

con  $c = 1$  a 4;  $m = 1$  (1983) a 27 (2009);  $n = 1$  (1931) a 77 (2007)

y para los 2 CM<sub>c</sub> combinados SW3 y SW6 el margen es el siguiente (se presenta solo el de SW3):

$$\text{Margen Neto CM}_5(m,n) = \text{Ingreso W3}(m,n) * (1 - \text{CVuW3}) - \text{CF W3} - \text{CE W3} + \text{Ingreso So3}(m,n) * (1 - \text{CVuSo3}) - \text{CF So3} - \text{CE So3}$$

En la Tabla 6 se indican 4 valores de Márgenes, en USD/Ha, de los CM<sub>c</sub> (m,n) que son parte de una matriz de 2079 filas (cantidad de escenarios) y 6 columnas (cantidad de CM<sub>c</sub>).

### 3.5 Margen de cada Estrategia

Si se multiplica la matriz de Márgenes de los CM<sub>c</sub>, de 2079 filas (escenarios) y 6 columnas (CM<sub>c</sub>) explicada en la subsección 3.4, por la traspuesta de 6 filas (CM<sub>c</sub>) y 472 columnas (estrategias) de la matriz de estrategias explicada en la subsección 3.1 y consignada en la Tabla 1, se obtiene una matriz de 2079 filas (escenarios) y 462 columnas (estrategias) que contienen los márgenes de las 462 Estrategias, en USD/Ha.

$$[\text{Margen Estrategias}] = [\text{Margen CMs}] \times \text{traspuesta} [\text{Estrategias}]$$

En la Tabla 7 se indican 6 valores de Márgenes de Estrategias ME (m,n), en USD/Ha, que son parte de una matriz de 2079 filas (cantidad de escenarios) y 462 columnas (cantidad de estrategias).

### 3.6 Regret de cada Estrategia

Según el paso IV, que consiste en evaluar las combinaciones de Estrategias y Escenarios, es necesaria una métrica que dé una idea acerca de qué tan favorable es el resultado de una estrategia determinada para cada escenario. Esta métrica podría ser directamente el Margen, asociando un alto margen a un buen resultado. Sin embargo, es necesaria una definición de resultado relativa y no absoluta: es posible que en algunos escenarios todas las estrategias posibles den márgenes bajos y aún así alguna estrategia puede ser considerada una buena opción, dado que relativamente presenta un margen mayor que las otras alternativas. Es por eso que sobre la matriz de márgenes de estrategias se puede entonces definir una métrica Regret (o lamento o arrepentimiento) para cada estrategia  $j$  y escenario  $i$  como la diferencia entre el máximo valor posible de otra estrategia (de otra columna  $j$ ) para ese mismo escenario (de esa misma fila  $i$ ):

$$\text{Regret}_{ij} = \text{ME}_{j\max} - \text{ME}_{ij}$$

En la Tabla 8 se muestran algunos de los valores de Regret correspondientes a los escenarios  $i=1$ ;  $i=584$  (Regret mínimo);  $i=1037$  (Regret máximo);  $i=2079$ , sobre el total de 2079 escenarios que pueden verse en Rojo et al (2013). Se muestran los valores de Regret de las Estrategias #195, #205, #203 y #198 (que se comentarán en la sección 4) en cada uno de esos 4 escenarios, así como el valor del tercer cuartil (3Q) de la distribución de Regret.

Un criterio para seleccionar una estrategia candidata inicial es seleccionar aquella que tenga un menor nivel de Regret. Dado que cada estrategia tiene un valor de Regret para cada escenario, la pregunta entonces es qué escenario considerar. Una opción muy conservadora sería tomar para cada estrategia  $j$  su peor escenario (máximo Regret) y luego elegir aquella estrategia que minimiza el máximo Regret. Con este criterio la estrategia robusta inicial sería la #159 cuyo máximo Regret es USD 553,90. Una opción menos conservadora que suele emplearse en DR es elegir aquella estrategia que tenga un bajo valor de tercer cuartil de distribución de Regret y con este criterio la estrategia robusta inicial sería la #195 (resaltada en la Tabla 1) cuyo valor de tercer cuartil de Regret es USD 146,34 según se consigna en la Tabla 8.

## 4 EL CASO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA. PASOS VI a VIII

El criterio del menor tercer cuartil del valor del Regret para seleccionar la estrategia candidata fue replicado del trabajo de Lempert

(2006) y es solamente un ejemplo de algunos otros criterios igualmente válidos. La intención de la metodología de decisiones robustas es estudiar en profundidad vulnerabilidades de estrategias candidatas. Dichas estrategias candidatas pueden ser también opciones de producción que los productores suelen elegir o cualquier otra estrategia que los decisores quieran investigar. Este trabajo estudiará la estrategia #195.

**Paso VI:** como se explicó en la sección 3, cada estrategia es evaluada en cada escenario según su valor de Regret. Si se considera solamente la estrategia candidata #195, se obtendrá un valor de Regret para cada uno de los 2079 escenarios. Es decir que habrá algunos escenarios en los que la estrategia #195 funciona bien y entonces los Regret serán bajos, algunos escenarios en los que la candidata funciona mal y mostrarán Regret alto y, por último, escenarios en los que la estrategia es la mejor posible y por lo tanto los Regret serán igual a cero. También se sabe que el 25% de los escenarios más desfavorables para dicha estrategia tienen un valor de Regret mayor a 146,34 USD/Ha porque ese valor es el que corresponde al tercer cuartil de distribución. Se puede decir entonces que la estrategia #195 tiene un resultado desfavorable cuando el Regret sea mayor a ese valor del tercer cuartil. Los escenarios en los que el Regret sea mayor serán considerados “malos” (25%) para la #195 y en los que el resultado sea menor serán considerados “buenos” (75%).

Ahora bien, los escenarios usados en la simulación están delimitados por un conjunto de parámetros relacionados con los Precios de los cultivos y el Clima. Para la construcción de escenarios se usaron datos históricos de precios y datos históricos climáticos diarios para estimar los rendimientos de los cultivos. Al decisor que quiera analizar cómo se comporta la estrategia candidata va a interesarle las vulnerabilidades, es decir, qué características tienen en común los escenarios “malos”. Para poder entender mejor las características de esos escenarios “malos” y comprender cómo es la separación entre los escenarios buenos y los malos se recurre a un algoritmo de Árbol de Clasificación. De los datos construidos en la simulación puede extraerse por extensión cuáles son esos escenarios. Se pudo ver, por ejemplo, que la estrategia #195 funcionaba mal cuando se considera el clima del año 1967 y los precios del año 1989, ya que al calcular el valor del Regret se verifica que éste es mayor a 146,34 USD/Ha. Sin embargo, esa información no es de mucha utilidad en esos términos porque, en definitiva, lo que le interesa al productor es saber si en el escenario futuro su estrategia candidata devuelve un resultado insatisfactorio.

Se construye, entonces, un set de datos con los resultados de los 2079 escenarios para la estrategia #195. Dichos escenarios quedaran definidos por: (i) precio de la soja, (ii) precio del maíz, (iii) precio del trigo y (iv) suma de lluvias en milímetros de noviembre a marzo. Los factores i a iii capturan las condiciones de precios y el factor iv captura la mayor parte de la variabilidad climática. En la Tabla 9 se indican los valores de los cuatro factores solamente para los escenarios  $i=1$ ,  $i=2079$ .

Con este set de datos se construye el árbol de decisión, que toma en cuenta cuáles son las principales características que definen a uno y otro

subconjunto. Dicho algoritmo es implementado en el lenguaje R con la librería RPART y opera de forma iterativa, separando la muestra de observaciones según los valores de sus parámetros. Es decir que el algoritmo hace múltiples separaciones tomando cortes arbitrarios de los valores de cada uno de los parámetros de las observaciones. Al final, se selecciona el árbol que mejor separa la muestra obtenida (ver Figura 1). Éste comienza separando los escenarios según el precio del maíz. Para la estrategia #195, aquellos escenarios que presenten un precio del maíz menor a 113 USD/Ton son clasificados como “buenos”. Este resultado parece lógico, dado que la estrategia #195 no tiene ningún porcentaje de maíz y, si el precio del maíz no es alto, la elección de la #195 es buena. El ancho de las ramas del árbol representa la cantidad de escenarios que son clasificados para cada lado de la separación. La condición separa hacia la izquierda los escenarios en los que la condición es verdadera y a la derecha los escenarios en donde la condición es falsa; el color de cada nodo y cada rama representan el porcentaje real de escenarios de la muestra que efectivamente fueron evaluados como malos (color rojo) y buenos (color verde). Los números debajo de cada nodo terminal indican cuántas observaciones de la muestra son clasificadas de acuerdo a la trayectoria que termina en dicho nodo: a la izquierda están los que efectivamente fueron “malos” y a la derecha los que fueron “buenos”.

**Pasos VI y VIII:** ahora, habiendo construido la clasificación, se puede dividir al conjunto total de escenarios en dos grupos. La estrategia #195 funciona bien para los escenarios buenos, pero para los escenarios malos existen otras estrategias posibles, como se muestra en la Figura 2 que muestra el gráfico de los resultados de las estrategias considerando los escenarios buenos (eje x) y los escenarios malos (eje y).

La estrategia #195 tiene un Regret 3Q cercano a 127 USD/Ha para los escenarios buenos, y si se consideran los escenarios malos, el Regret es mayor: 248 USD/Ha. Una estrategia es mejor cuanto menor sea el valor del Regret para ambos conjuntos de escenarios (representados en cada uno de los dos ejes). El tomador de decisiones establece cuál es su mejor opción, considerando un balance entre los dos conjuntos de escenarios. Suponiendo que los escenarios malos son probables, preferirá sacrificar algún resultado monetario en escenarios buenos en virtud de un mejor resultado para los escenarios malos. Por ejemplo, la estrategia #193 tiene un Regret de 134 USD/Ha para los escenarios buenos, 7 USD/Ha mayor que la candidata original #195. Sin embargo, para el otro conjunto de escenarios tiene aproximadamente 218 USD/Ha de Regret, es decir, 30 USD/Ha menos. El balance vale la pena si el decisor considera que los escenarios malos son probables. Se delimita así una curva de estrategias integrada por las estrategias #195, #205, #193, #203, #188, #198 y #179, cada una de ellas correspondiente a la asignación de terreno que se muestra en la Figura 3. Estas estrategias definen la frontera con mejor performance entre los escenarios considerados, la cual permite elegir una nueva estrategia robusta.

## 5 COMENTARIOS FINALES Y PRÓXIMOS PASOS

El análisis precedente permite profundizar las vulnerabilidades de la primera estrategia robusta #195, proponiendo nuevas estrategias que pueden mejorar la cobertura para escenarios en los que ésta es vulnerable.

Estas nuevas estrategias #205, #193, #203, #188, #198 y #179 conforman una frontera de preferencia. Es interesante mencionar que la estrategia #205 también es obtenida mediante un análisis de decisión tradicional, como puede ser la teoría de la utilidad esperada para un coeficiente de aversión al riesgo estándar. Por otro lado, las estrategias ricas en maíz son propias de este análisis de robustez. Es decir que un productor elegirá por ejemplo la estrategia #193 si prefiere cubrirse de malos resultados obtenidos que se pueden producir en los escenarios identificados en las secciones anteriores.

Para las próximas etapas que continúen la línea de investigación se está considerando: (i) incorporar más variables climáticas para la mejor identificación de vulnerabilidades, (ii) evaluar cómo se podrían definir estrategias adaptativas, es decir, establecer mecanismos de selección que corrijan la decisión de acuerdo con las características del escenario anterior y (iii) comparar los resultados de esta metodología de decisiones robustas frente a los métodos de soporte de decisión tradicionales.

## 6 TABLAS Y FIGURAS

**Tabla 1: Estructura de las estrategias**

Estr.	Ma4	Ma5	So1	So6	SW3	SW6
1	1	0	0	0	0	0
2	5/6	1/6	0	0	0	0
3	2/3	1/3	0	0	0	0
...						
<b>195</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>½</b>	<b>1/2</b>	<b>0</b>
...						
198	0	1/3	0	0	2/3	0

Estr.	Ma4	Ma5	So1	So6	SW1	SW6
.....						
203	0	1/6	0	1/6	2/6	0
.....						
459	0	0	1/6	0	0	5/6
460	0	0	0	1/6	0	5/6
461	0	0	0	0	1/6	5/6
462	0	0	0	0	0	1

**Tabla 2: Precios históricos de los CM<sub>c</sub>, en USD/Ha**

M	Año	Ma4 (CM <sub>1</sub> )	Ma5 (CM <sub>2</sub> )	So1 (CM <sub>3</sub> )	So6 (CM <sub>4</sub> )	W3 (parte del CM <sub>5</sub> )	W6 (parte del CM <sub>5</sub> )	So3 (parte del CM <sub>6</sub> )	So6 (parte del CM <sub>6</sub> )
1	1983	108,03	108,03	214,55	214,55	121,40	121,40	214,55	214,55
2	1984	106,70	106,70	218,53	218,53	122,87	122,87	218,53	218,53
.....									
26	2008	140,63	140,63	241,25	241,25	165,97	165,97	241,25	241,25
27	2009	106,82	106,82	252,37	252,37	117,55	117,55	252,37	252,37

**Tabla 3: Rendimientos simulados de los CM<sub>c</sub>, en Ton/Ha**

N	Año	Ma4 (CM1)	Ma5 (CM2)	So1 (CM3)	So6 (CM4)	W3 (parte del CM5)	W6 (parte del CM5)	So3 (parte del CM6)	So6 (parte del CM6)
1	1931	9401	7632	3098	3388	4403	3909	2263	1843
...									
77	2007	7609	8043	2945	3088	3678	3927	530	556

**Tabla 4: Ingreso de los CMc en USD/Ha**

Escenario	Ma4 (CM <sub>1</sub> )	.....	So6 (CM <sub>4</sub> )	W3 (parte del CM <sub>5</sub> )	.....	So6 (parte del CM <sub>6</sub> )
1 (m=1; n=1)	1015,59	.....	726,89	534,52	.....	395,41
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2079 (m=27; n=77)	812,79	.....	779,31	432,34	.....	140,31

**Tabla 5: Costos de los CMc**

	Ma4	Ma5	So1	So6	W3	W6	So3	So6
CVu	0,28	0,28	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27
CF (USD/Ha)	332,03	271,13	174,07	170,27	198,80	236,48	104,76	104,76
CE (USD/Ha)	365,68	365,68	365,68	365,68	182,84	182,84	182,84	182,84

**Tabla 6: Márgenes de los CMc, en USD/Ha**

Escenario	Ma4 (CM1)	.....	SW6 (CM6)
1	33,515	.....	- 76,589
.....	.....	.....	.....
2079	- 112,499	.....	- 272,122

**Tabla 7: Márgenes de las estrategias, en USD/Ha**

Escenario	Estr #1	.....	Estr #195	.....	Estr #462
1	33,515	.....	32,368	.....	- 76 ,89
.....	.....	.....	.....	.....	.....
2079	- 112,499	.....	-113,677	.....	-272,122

**Tabla 8: Regret de las estrategias #195, #198, #203, #205.**

Escenario	Estr #195	Estr #198	Estr #203	Estr #205
1	37,3	37,7	31,4	25,1
.....	.....	.....	.....	.....
584	0,3	67,9	34,1	0,2
.....	.....	.....	.....	.....

1037	859,1	593,5	708,2	882,9
.....	.....	.....	.....	.....
2079	146,6	212,6	204,0	195,5
reg 3er quartile	146,34	160,7	155,5	151,0

**Tabla 9: Precios (en USD/Ton) y Precipitaciones (en milímetros) para cada escenario**

Escenario	Precio maíz ("Maize")	Precio soja ("Soybean")	Precio trigo ("Wheat")	Precipitación <sup>5</sup> ("Pp")
1	108,03	214,55	121,4	574,9
.....				
2079	106,82	252,37	117,55	526,52

---

<sup>5</sup> Es la suma de las lluvias en mm desde octubre a junio

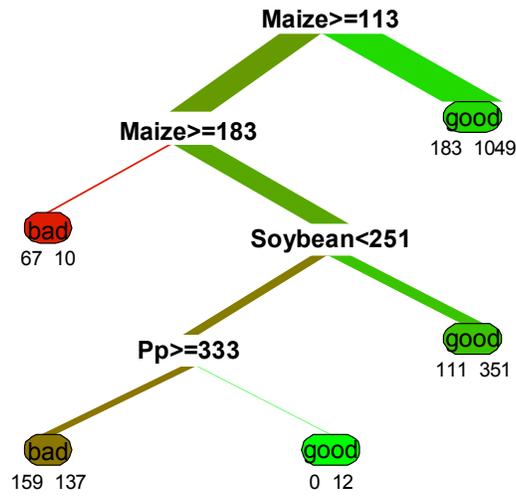


Figura 1: Árbol de decisión para clasificar los escenarios simulados según el resultado de la estrategia #195 en cada uno de ellos

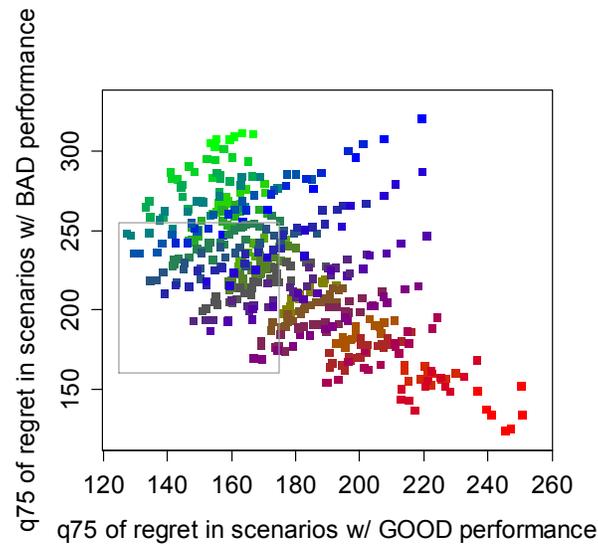
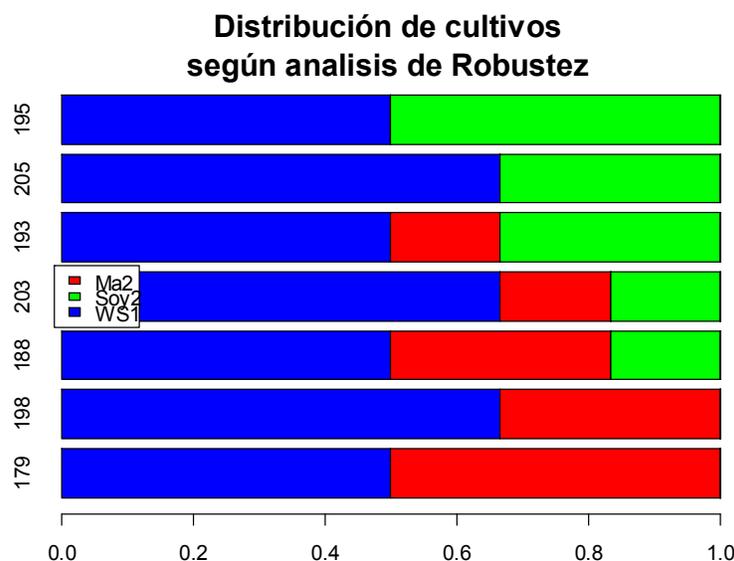


Figura 2: Distribución de estrategias según su Regret en cada grupo de escenarios (“buenos” y “malos” para la estrategia #195)

Nota: Cada punto en la figura 2 corresponde a una estrategia; el color del punto representa el porcentaje de Soja (color verde), Trigo-Soja (color azul) y Maíz (color rojo). En el eje horizontal se indica el Regret 3Q considerando solamente los escenarios buenos y en el eje vertical se consigna el Regret 3Q de cada punto (estrategia) considerando los escenarios malos.



**Figura 3: Porcentaje de asignación de terreno para las estrategias resultantes de la frontera del análisis de robustez (#195, #205, #193, #203, #188, #198, #179)**

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BERT F., SATORRE E., RUIZ TORANZO F., PODESTÁ G., (2006). "Climatic information and decision-making in maize crop production systems of Argentinean Pampas". *Agric Syst* 88, pp 180–204
2. BERT F., PODESTÁ G., SATORRE E., MESSINA C. (2007) "Usability of climate information on decisions related to soybean production systems of Argentine Pampas". *Clim Res* 33, pp 123–143
3. BRYANT B.P., LEMPERT R.J. (2010) "Thinking inside the box: A participatory computer-assisted approach to scenario discovery". *Technological Forecasting Social Change*, pp 34 a 49.
4. GONZÁLEZ X. I. (2012): "Aplicación de Decisiones Robustas a la asignación del uso de la tierra entre diferentes actividades agrícolas". *Anales XXV ENDIO - XXIII EPIO*, pp 520 a 535, Ciudad Autónoma de Buenos Aires
5. JONES J., TSUJI G., HOOGENBOOM G., HUNT L., THORNTON P., WILKENS P., IMAMURA D., BOWEN W., SINGH U. (1998) "Decision support system for agrotechnology transfer". Kluwe, Dordrecht, The Netherlands, pp 157-177

6. KASPRZYK J. R., NATARAJ S., REED P.M., LEMPERS M. J. (2013) "Many objective robust decision making for complex environmental system undergoing change". *Environmental Modelling & Software*, pp 1 a 17.
7. LEMPERS R. J. et al (2006): "A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios". *Management Science*, vol. 52, n° 4, pp 514 a 525
8. LEMPERS R.J., COLLINS M.T. (2007). "Managing the risk of uncertain threshold responses: comparison of robust, optimum and precautionary approaches". *Risk Analysis* Vol 27, N° 4, pp 1009 a 1026.
9. LEMPERS R.J., GROVES D.G. (2010). "Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west". *Technological Forecastin & Social Change*, pp 960 a 974.
10. LETSON D., LACIANA C. E., BERT F. E., WEBER E. U., – KATZ R. W., GONZÁLEZ X. I., PODESTÁ G. P., (2008). "Value of perfect ENSO phase predictions for agriculture: evaluating the impact of land tenure and decision objectives". *Climatic Change*".
11. MULVEY, S. A. et al (1995): "Robust Optimization of Large-Scale Systems". *Operations Research*, Vol 43, pp 264 a 280.
12. PODESTÁ, G.P., WEBER E.U., LACIANA C, BERT F., LETSON D. (2008) "Agricultural decision-making in the Argentine Pampas: modeling the interaction between uncertain and complex environments and heterogeneous and complex decision makers". In: Kugler T, Smith JC, Connolly T, Son Y-J (eds) *Decision modeling and behavior in uncertain and complex environments*. Springer optimization and its applications, vol 21, pp 57 a 78
13. ROJO H., RAMOS S. A., GONZÁLEZ X. I., RASPA L., WAINSTOCK A., KALMUS D. (2013): "Procedimiento para identificar estrategias iniciales en una metodología de decisiones robustas aplicada a sistemas agropecuarios". *Anales XXVI ENDIO - XXIV EPIO*, Ciudad de Córdoba.
14. STAKHIV, E. Z. (2011). "Pragmatic approach for the wáter management under climate change uncertainty". *Journal of the American water resources association*, Vol 47, N° 6, pp 1183 a 1196.
15. ULLMAN G. (2006). "Making Robust Decisions: Decision Management for Technical, Business, & Service Teams". Trafford Publishing. Reino Unido.