

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE ECONOMIA**

**PROGRAMA DE MAESTRIA EN ECONOMIA DEL MEDIO AMBIENTE  
Y LOS RECURSOS NATURALES**

**ARTICULO PUBLICABLE:**

**ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉCNICA Y AMBIENTAL  
A TRAVÉS DE LA FRONTERA DE PRODUCCIÓN ESTOCÁSTICA: EL CASO  
DE LOS PRODUCTORES DE ARROZ EN COLOMBIA**

**Claudia Paola Morales**

**Asesor**

**Dr. Jorge Higinio Maldonado**

**2005**

*Estimación de la Eficiencia Técnica y Ambiental a través de la Frontera de Producción Estocástica: El Caso de los Productores de Arroz en Colombia \**

**Claudia Paola Morales**

**Resumen:** En el presente trabajo se estima la Eficiencia Técnica y Ambiental de 110 productores de 4 zonas de Colombia (el Centro, los Llanos, la Costa Nor-Oriental y el Bajo Cauca), para datos panel balanceados correspondientes al primer semestre de los años 1999 y 2000. El método de estimación empleado se basa en la metodología de Frontera Estocástica de Producción, calculada para tres modelos: Modelo Conjunto (en el que se incluye la variable tipo de sistema en la forma funcional) y Modelo por Sistemas (una frontera para el sistema de riego y otra para el sistema de secano). Se utilizó el exceso de nitrógeno como una variable proxy para medir el desempeño ambiental de los productores de arroz.

Los resultados muestran que el modelo separado por sistemas presenta niveles de eficiencia técnica mayores (89,3%), que el modelo conjunto (87,8%) pero de eficiencia ambiental menores (83,9% para el modelo conjunto y 81,8% para el modelo por sistemas); pero para ambos modelos se observa una correlación positiva entre ambas eficiencias. Por otra parte, los sistemas de secano parecen ser más eficientes ambientalmente que los sistemas de riego (los cuales son técnicamente más eficientes). Se observa una buena transferencia de tecnología de los productores más eficientes a los menos eficientes, haciendo que haya una mayor concentración en los niveles de eficiencia más altos. No se observan problemas graves en las eficiencias técnica y ambiental de los productores de arroz mostrando niveles promedio de eficiencias altos en ambos casos.

**Clasificación JEL:** C33, D21, D24, Q12, Q18.

**Palabras Clave:** Eficiencia Técnica, Eficiencia Ambiental, Arroz, Secano, Riego, Colombia

---

\* Artículo publicable presentado para optar el título de Magíster en Economía del Medio Ambiente y los Recursos Naturales.

## **TABLA DE CONTENIDO**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| 1. Introducción  | 1           |
| 2. Revisión Bibliográfica  | 3           |
| 3. Marco Teórico   | 6           |
| 3.1 Métodos de Estimación  | 7           |
| 3.1.1 Análisis Envolvente de Datos (DEA)                                   | 7           |
| 3.1.2 Frontera de Producción Estocástica (SPF)                             | 8           |
| 3.2 Modelo General   | 12          |
| 4. Metodología   | 16          |
| 4.1 Datos  | 16          |
| 4.2 Modelos Empíricos  | 19          |
| 4.2.1 Función de Producción Estocástica                                    | 19          |
| 5. Resultados  | 25          |
| 5.1 Frontera Estocástica de Producción                                     | 25          |
| 5.1.1 Eficiencia Técnica para el Modelo Conjunto                           | 27          |
| 5.1.2 Eficiencia Técnica para los Modelos Separados por<br>Tipo de Sistema | 30          |
| 5.1.3 Eficiencia Ambiental para el Modelo Conjunto                         | 36          |
| 5.1.4 Eficiencia Ambiental para los Modelos por Tipo de<br>Sistema         | 40          |
| 5.2 Fuentes de Ineficiencia Técnica y Ambiental                            | 44          |
| 6. Conclusiones y Recomendaciones  | 45          |
| 7. Bibliografía  | 48          |

## LISTA DE TABLAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Tabla 1. Descripción (Unitaria y Porcentual) de las Variables de Estratificación por Zonas  | 19          |
| Tabla 2. Descripción de las Variables Usadas en el Modelo de Frontera Estocástica   | 21          |
| Tabla 3. Descripción de las Variables Usadas para Analizar las Eficiencias  | 22          |
| Tabla 4. Estadísticas Descriptivas de las Variables Utilizadas para la Estimación de la Frontera Estocástica para cada uno de los Tipos de Sistema de Cultivo | 23          |
| Tabla 5. Estructura de Costos de Producción del Cultivo de Arroz para el Sistema de Secano (\$/ha.)   | 24          |
| Tabla 6. Estructura de Costos de Producción del Cultivo de Arroz para el Sistema de Riego (\$/ha.)  | 24          |
| Tabla 7. Parámetros Estimados para el Modelo Conjunto a través de la Frontera Estocástica de Producción   | 26          |
| Tabla 8. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Técnica para el Modelo Conjunto  | 29          |
| Tabla 9. Parámetros Estimados para los Modelos de Secano y de Riego   | 31          |
| Tabla 10. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Técnica para los Modelos por Sistema  | 34          |
| Tabla 11. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Ambiental para el Modelo Conjunto   | 37          |
| Tabla 12. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Ambiental el Modelo de Sistemas   | 41          |

## LISTA DE FIGURAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Medida de Eficiencia Técnica Orientada a Producción   | 10          |
| Figura 2. Medida de Eficiencia Ambiental Orientada a Insumo   | 11          |
| Figura 3. Mapa de las Zonas Arroceras de Colombia   | 17          |
| Figura 4. Histograma de Frecuencia de la Eficiencia Técnica para el Modelo Conjunto   | 28          |
| Figura 5. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para el Modelo Conjunto  | 29          |
| Figura 6. Rangos de Eficiencia Técnica para el Modelo por Sistemas  | 34          |
| Figura 7. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para el Modelo por Sistemas  | 35          |
| Figura 8. Histograma de Frecuencia de Eficiencia Ambiental para el Modelo Conjunto  | 37          |
| Figura 9. Rangos de Eficiencia Ambiental por Zonas para el Modelo Conjunto  | 38          |
| Figura 10. Comparación de los Valores de Eficiencia Técnica y de Eficiencia Ambiental para cada Productor en el Modelo Conjunto     | 39          |
| Figura 11. Histograma de Frecuencia de Eficiencia Ambiental para el Modelo por Sistema de Cultivo                                   | 40          |
| Figura 12. Rangos de Eficiencia Ambiental por Zonas para el Modelo por Sistemas   | 42          |
| Figura 13. Comparación de los Valores de Eficiencia Técnica y de Eficiencia Ambiental para cada Productor en el Modelo por Sistemas | 43          |

## ANEXOS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Anexo A. Derivación de la Ecuación de Eficiencia Ambiental   | 52          |
| Anexo B. Gráficos de las Variables de Estratificación para cada Zona   | 54          |
| Anexo C. Estadísticas Descriptivas   | 55          |
| Anexo D. Modelos Utilizados en la Construcción de la Variable Proxy del Exceso de Nitrógeno y los Óptimos Técnicos Obtenidos | 56          |
| Anexo E. Frontera de Producción Estocástica para el Modelo Conjunto  | 58          |
| Anexo F. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas  | 59          |
| Anexo G. Frontera de Producción Estocástica para los Modelos por Sistema   | 62          |
| Anexo H. Rangos de Eficiencia Ambiental  | 64          |
| Anexo I. Gráficos de las Variables que pueden Ayudar a Explicar el Comportamiento de las Eficiencias                         | 67          |

## **Dedicatoria**

Deseo dedicar mi trabajo, en primer lugar, a Dios, por las oportunidades tan maravillosas que me ha brindado en la vida; a mis mamás Gladys y Susana, quienes siempre han estado allí para amarme, apoyarme y contribuir en mi crecimiento como persona y como profesional, a ustedes les debo todo el éxito que he conseguido en la vida; a mis hermanos Gerardo, Andrea, Valerie y Alessandra, a quienes adoro y a quienes espero dar un buen ejemplo, ya vendrá el momento de compartir sus triunfos; al resto de mi familia, que me ha apoyado en todo momento y a mis amigos Camilo Lozano, Joanna Kámiche y Mary Galindo, a quienes considero mucho más que amigos, consiguiendo en ellos el apoyo y la comprensión que he necesitado, nunca los podré olvidar, forman parte de mi vida.

## **Agradecimiento**

Quisiera agradecer, en primer lugar, a mi asesor Dr. Jorge Higinio Maldonado, quien me ha ayudado y apoyado incondicionalmente a finalizar exitosamente mi investigación, su ayuda ha sido valiosa para mi, muchísimas gracias; a los Sres. Néstor Gutiérrez y José Levis Baron, personal de Investigaciones de Fedearroz, quienes me facilitaron la base de datos y contribuyeron en el soporte de mis resultados; al Dr. Ramón Rosales y al Dr. Henry Samacá, miembros del jurado, por sus valiosos comentarios para el mejoramiento de mi tesis; al Dr. Knox Novell (University of Georgia, University of the Sunshine COSAT – Australia) quien ha sabido guiarme en la elaboración de mi trabajo; al Dr. Tim Coelli (Centre for Efficiency and Productivity Analysis, University of New England, Australia) por su valiosa ayuda y a la profesora Katja Vinha por los comentarios realizados.



## 1. Introducción

El cultivo de arroz es uno de los cultivos de ciclo corto de mayor importancia en Colombia, no sólo desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, sino también como fuente de empleo y de ingresos (en 1999 dependían directamente de éste 28.128 productores y sus familias, cultivando 33.435 unidades productoras de arroz<sup>1</sup>). Así mismo, se ha visto que desde el año 1988, y hasta 1999, el número de productores ha aumentado en un 60,6%, las unidades productoras han aumentado en un 67,4%, el área cultivada en un 19%, la producción en un 30,8% y la productividad en un 3,8%. (Fedearroz, 2000). Es posible que este aumento en la producción de arroz haya venido acompañado de prácticas indiscriminadas en el uso de sustancias agroquímicas para una más rápida respuesta del cultivo y para combatir las plagas y malezas, pero teniendo, por otro lado, repercusiones negativas sobre el medio ambiente.

Por otra parte, han surgido en la práctica innovaciones tecnológicas eco-eficientes como el manejo integrado de plagas, el control biológico de plagas, la bio-fertilización y el manejo orgánico, que pueden ser parte integral de la estrategia del productor para corregir los impactos de la degradación ambiental y requeridas para una productividad sostenible (Srivastava, 2002). Pero la aplicación de estas innovaciones, así como de la introducción de las nuevas variedades de arroz, ha sido lenta, sobre todo en aquellas zonas en las que hay problemas físicos como sequía, salinidad y acidez (FAO, 2003). Esto trae como consecuencia que efectos ambientales como la contaminación del suelo, del agua, etc., (llamados bienes no deseables), sean resultado del proceso productivo (que pueden estar favorecidos por las condiciones naturales como tipo de suelo, clima, etc.) y que se obtengan como un subproducto de la aplicación de insumos (pesticidas, exceso de nutrientes, etc.).

---

<sup>1</sup> Una unidad productora de arroz es todo terreno aprovechado en la producción de arroz, con administración independiente, sin tomar en cuenta el tamaño, la condición de tenencia, el sistema de producción o el destino de la producción (Fedearroz, 2000).

Para el caso de la agricultura, los problemas de contaminación por el uso excesivo de nutrientes y agroquímicos se vuelve complejo, puesto que el exceso que produce deterioro ambiental es el resultado de un balance entre lo que “entra” en el proceso productivo (como insumo) y lo que “sale” a través de la cosecha (Lauwers y Van Huylenbroeck, 2003).

Bajo esta premisa de crecimiento en el sector arrocero, se desea realizar un estudio que permita identificar si los productores de arroz están llevando a cabo prácticas eficientes técnica<sup>2</sup> y ambientalmente<sup>3</sup> (con lo que estarían produciendo sobre la frontera de producción), lo que se verá reflejado individualmente según la manera en la que lleven a cabo su proceso productivo. De esta manera podrá observarse si el problema de ineficiencia es grave o no y, así mismo, se intentará analizar cómo influyen algunas variables sobre éstas, lo que podría dar evidencia sobre las posibles fuentes del problema, para así identificar posibles soluciones.

Para ello se pretende aplicar una metodología que permita analizar estas ineficiencias a los productores de arroz pertenecientes a las zonas del Centro, Bajo Cauca, Costa Nor-Oriental y Llanos en Colombia para cada sistema de cultivo de arroz<sup>4</sup>. Esta metodología se enfoca al análisis de la aplicación de insumos que pueden ser cuantificados (sin tener en cuenta las condiciones naturales que pueden influenciar en el deterioro ambiental) y no en la determinación y/o cuantificación del daño ambiental.

Así, el objetivo general del presente trabajo es el de evaluar la eficiencia técnica y ambiental de los productores de arroz en Colombia para cada sistema de cultivo, asumiendo que habrá diferencias sobre las eficiencias según el sistema que los productores utilicen.

Para ello se pretende:

---

<sup>2</sup>Entendiéndose por prácticas técnicamente eficientes aquellas en la que los productores han encontrado la combinación óptima y el uso eficiente de insumos en el proceso productivo.

<sup>3</sup> Los productores son ambientalmente eficientes si encuentran aquella combinación óptima de insumos que permitan tener un menor impacto sobre el medio ambiente en el proceso productivo, manteniendo su máximo nivel de producción.

<sup>4</sup>Riego y Secano

- i) Estimar tres funciones de producción primal del cultivo de arroz, una que incluya el sistema de cultivo como una variable más dentro de la función de producción y las otras dos para cada tipo de sistema, a través del cálculo de su frontera de producción, por medio de la metodología de Frontera Estocástica de Producción.
- ii) Estimar las eficiencias técnica y ambiental para cada frontera de producción estimada y analizar las diferencias entre éstas.
- iii) Analizar las fuentes de ineficiencia en cada uno.

## 2. Revisión Bibliográfica

La eficiencia técnica ha sido aplicada en numerosos campos de investigación. En el sector agrícola, Bayacag y Rola (2001) utilizaron la metodología de frontera estocástica<sup>5</sup> para estimar la influencia que tienen, sobre la eficiencia técnica, el conocimiento técnico y ecológico de los productores de maíz de Bukdnon-Filipinas, a través de dos modelos en los cuales los productores enfrentaban iguales y diferentes condiciones ambientales; las diferencias en eficiencia técnica entre ambos modelos mostró la influencia de las condiciones ambientales sobre ésta.

Krasachat (2003) estimó la eficiencia técnica de los productores de arroz en Tailandia a través de la metodología DEA<sup>6</sup> (para el año 1999), empleando una regresión Tobit para investigar los factores que la afectan. Los resultados muestran que hay posibilidades de incrementar los niveles de eficiencia a través del uso de los servicios de extensión, pues hay una relación positiva entre éstos y la eficiencia técnica.

Fernández, Koop y Steel (2003) estimaron la eficiencia técnica utilizando el enfoque de multiproducto<sup>7</sup>, a través de métodos Bayesianos para 163 granjas lecheras en Holanda, utilizando como productos el exceso de nitrógeno (como bien no deseable<sup>8</sup>) y la producción de carne, la ganadería y alimento como productos deseables.

---

<sup>5</sup> Explicada en el Marco Empírico

<sup>6</sup> Comentada en el Marco Empírico

<sup>7</sup> Maximización de la producción, extendiéndose a varios bienes producidos.

<sup>8</sup> Las externalidades, que son el resultado de practicar una tecnología dada, son vistas como “males” (productos indeseables o subproductos) asociados con la producción de bienes (bienes deseables).

Kebede (2001) identificó los determinantes de los niveles de eficiencia de los productores de arroz de Nepal, utilizando la metodología de Frontera Estocástica de Producción, obteniendo como resultado niveles de eficiencia del 71% y que las variables socioeconómicas como años de experiencia, nivel educativo y el crédito tienen una influencia positiva sobre la eficiencia; pero la dirección de causalidad entre la eficiencia técnica y las variables ambientales (calidad del suelo) no pudo ser determinada. Por otra parte, obtuvo que aquellos productores con niveles de eficiencia técnica por debajo del 71% se mostraron preocupados acerca de la degradación ambiental y estarían dispuestos a renunciar a algún ingreso para evitar la degradación del suelo.

En cuanto al análisis ambiental, sobre todo en el sector agrícola, medir su eficiencia es un poco más complejo, por cuanto es difícil cuantificar los efectos ambientalmente nocivos que son el resultado de un balance entre lo que entra como materia prima y lo que sale como producto, siendo estos efectos nocivos producidos como resultado de la actividad económica, que pueden estar ligados a los insumos, a los productos o a ambos.

Es por eso que existen diferentes aproximaciones en cuanto a cómo analizar el daño ambiental producido en el proceso productivo: Tyteca (1997) (citado en Lauwers y Van Huylenbroeck, 2003) afirma que el modelo de desempeño ambiental difiere en la manera como se midan los contaminantes, si como productos o como insumos utilizados en el proceso productivo.

Asmild y Hougaard (2002), estimaron la eficiencia económica y ambiental en las granjas de cerdos danesas, por medio de la técnica no paramétrica DEA. Para ello, utilizaron el nitrato, el fósforo y el potasio removido como variables ambientales que fueron incluidas como productos no deseables.

Lauwers y Van Huylenbroeck (2003) estimaron la eficiencia ambiental usando los contaminantes como insumos en el proceso productivo (exceso de nutrientes) en las granjas de cerdos de Bélgica, utilizando la metodología no paramétrica DEA. Para ello se basaron en el modelo de balance de materiales, donde la materia prima debe balancearse con el producto obtenido.

Así mismo, Reinhard, Lovell y Thijssen (1997), estimaron la eficiencia ambiental de los productores de leche en Holanda, aplicando tanto la metodología paramétrica (frontera estocástica de producción: SPF) como la no paramétrica (DEA), para múltiples insumos ambientalmente nocivos (exceso de fosfato y nitrógeno y uso - directo e indirecto- de energía), analizando las diferencias en las magnitudes de los estimados de eficiencia. Los resultados obtenidos muestran que existen diferencias en las medias de ambas eficiencias (eficiencia técnica: 89% para SPF y 78% para DEA; eficiencia ambiental: 80% para SPF y 52% para DEA), debido a la naturaleza de cada metodología (la primera estocástica y la segunda determinística) y a su capacidad para incorporar los ruidos estadísticos, así como el de realizar pruebas estadísticas sobre las restricciones impuestas sobre los modelos.

En otro estudio, estos mismos autores calcularon la eficiencia técnica y ambiental en este sector, estimando una frontera estocástica de producción translogarítmica y usando el exceso de nitrógeno como un insumo que contamina el ambiente, el cual fue calculado bajo la condición de balance de materiales (Reinhard, Lovell y Thijssen, 1997). Los resultados muestran valores promedio de eficiencia técnica y ambiental de 0.89 y 0.44, respectivamente; además de que existe una relación positiva entre la eficiencia técnica y la eficiencia ambiental, salvo algunas excepciones.

En los trabajos mencionados anteriormente, los autores analizaron la eficiencia técnica y/o ambiental para el sector pecuario o agrícola. En el sector arrocero, los estudios se han enfocado en la eficiencia técnica (Krasachat, 2003; Kebede, 2001; Sriboonchitta y Wiboonpongse, 1999). En el presente trabajo, se procederá a estimar la eficiencia técnica y ambiental en el cultivo de arroz a través de la frontera de producción estocástica y, así mismo, se espera analizar la influencia de algunas variables explicativas sobre éstas.

### 3. Marco Teórico

Las medidas de eficiencia son estimadas bajo la relación entre producto e insumos, es decir, la mayor cantidad de producción a obtener dado un conjunto de insumos y están muy relacionadas con las fronteras de producción. Esto debido a que la frontera refleja el estado de una tecnología.

Como lo expresa Bauer (1990), el uso de modelos de fronteras se ha venido incrementando por las siguientes razones:

- 1 La noción de frontera es consistente con la teoría económica fundamental: las empresas tienen un comportamiento optimizador.
- 2 Las desviaciones desde la frontera tienen una natural interpretación como una medida de la eficiencia.
- 3 La información acerca de la estructura de la frontera y acerca de la eficiencia relativa de las unidades económicas tienen muchas aplicaciones de política.

Asumiendo que las empresas tienen un comportamiento racional con el cual maximizan beneficios o minimizan costos en sus procesos productivos obtienen, para un conjunto dado de insumos, productos deseables y no deseables, usando una tecnología dada:

$$F(y, l, x) = 0 \quad (1)$$

Donde  $y$  se refiere al vector de bienes deseables producidos con la tecnología,  $l$  al vector de bienes no deseables producto de los insumos usados y de la producción de  $y$ , y  $x$  al vector de insumos utilizados en el proceso productivo.

Es decir, con la tecnología e insumos dados, se puede producir tanto  $y$  como  $l$

$$T = \left\{ (x, y, l) : x \text{ puede producir } (y, l) \right\} \quad (2)$$

Esto se da a través del supuesto de que la producción de bienes deseables y no deseables es nula conjuntamente, es decir, que para dejar de producir bienes no deseables, deben dejarse de producir bienes deseables. En el presente estudio, se asume que para disminuir la producción de bienes no deseables se debe disminuir el uso del insumo que la produce, al que se llamará insumo no convencional ( $b$ ). A este enfoque se

le denomina noción no radial de insumo eficiencia, puesto que sólo disminuye un solo insumo, el que produce contaminación<sup>9</sup>.

Como lo explican Murillo y Vega (2000), las medidas de eficiencia de productividad han sido vinculadas cercanamente al uso de funciones de fronteras. Por ello, las medidas de eficiencia requieren la definición de una frontera que pueda reflejar la distancia que hay desde un punto hasta ésta, cuya diferencia representará la ineficiencia (Ebersberger, Cantner y Hanusch, 2000). Por lo tanto, la manera como se construye la frontera es muy importante y para ello existen diversos métodos de estimación, que serán explicados a continuación.

### **3.1 Métodos de Estimación**

Los métodos utilizados para estimar la frontera y, a partir de ella, la eficiencia de una firma, pueden ser no paramétricos o matemáticos: Análisis Envolvente de Datos (DEA, siglas en inglés), y paramétricos o econométricos: Frontera de Producción Estocástica (SPF, siglas en inglés), Funciones de Costos y Funciones de Distancia. A continuación se describen los métodos comúnmente usados:

#### **3.1.1 Análisis Envolvente de Datos (DEA)**

Está basado en programación lineal o matemática y evalúa el desempeño de unidades de producción, que se asume utilizan la misma tecnología de producción, pudiéndose ajustar a múltiples productos e insumos; sin embargo, es extremadamente sensible a los errores, pues no puede distinguir entre los errores aleatorios y la ineficiencia por su naturaleza determinística. En esta sensibilidad se basa su mayor crítica, asumiendo que todas las variaciones en el desempeño de un firma se atribuyen a la ineficiencia, sin tener en cuenta que pueden haber errores de medidas, de omisión de variables y de efectos exógenos. (Henderson, 2003).

Por otra parte, no permite estimaciones para datos de panel, por lo que un nuevo conjunto de posibilidades de producción debe ser calculado para cada año, así cada

---

<sup>9</sup> También existe el enfoque radial que consiste en hacer una reducción equiproporcional de todos los insumos utilizados en el proceso productivo. Este enfoque no será aplicado en el estudio.

observación es comparada con la frontera del conjunto de posibilidades de producción de cada año (Reinhard, Lovell y Thijssen, 1997). Pero, por otro lado, no requiere especificar una forma funcional de la frontera ni asumir una distribución para el término aleatorio del error y el término de ineficiencia, lo que puede causar problemas en las estimaciones de la tecnología y/o del término de error de ineficiencia (Murillo y Vega, 2000).

### **3.1.2 Frontera de Producción Estocástica (SPF)**

Esta metodología estima econométricamente una forma funcional elegida previamente que especifica la relación entre producción y niveles de insumos, y de la cual dependerá la calidad de la medida de eficiencia (Henderson, 2003), usando dos términos de error. Un término de error es el error aleatorio tradicional independiente e idénticamente distribuido (i.i.d.) como una normal con media cero y varianza constante. El otro es un término asimétrico que representa la ineficiencia técnica, independiente del primero, no negativo, inobservable y que puede ser expresado como una normal truncada, seminormal, exponencial o distribución gamma de dos parámetros. No hay una razón a priori para escoger una forma distribucional sobre otra, y todas tienen sus ventajas y desventajas; por ejemplo, las distribuciones exponencial y seminormal tienen una moda de cero, lo que implica que una alta proporción de las firmas que serán examinadas son perfectamente eficientes. En la distribución normal truncada, su moda es más grande que cero, con lo cual las proporciones de las firmas que operan en la muestra pueden variar (Pascoe *et al.*, 2003). Cuando el término de ineficiencia técnica es cero, una máxima cantidad de bienes son producidos dados unos insumos y cuando es mayor que cero, la máxima producción no es obtenida, operando en algún nivel de ineficiencia.

Una desventaja de esta metodología, como lo señalan Aguirre, Peña y Cerda (2002), es que el tener que asumir una forma funcional y una distribución para el término de ineficiencia, puede confundir los efectos de una errónea escogencia de la forma funcional y la ineficiencia. Por otra parte, Kirkley y Squires (1999) señalan que



su mayor crítica se basa en que la metodología no es capaz de manejar adecuadamente múltiples bienes producidos.

Para el presente trabajo, se utilizará la técnica paramétrica estocástica, cuya principal característica es su término del error compuesto que separa la ineficiencia técnica de otros ruidos aleatorios y porque, como lo explican Coelli *et al.* (citado en Nahm y Sutummakid, 2003), las fronteras estocásticas son preferidas y más apropiadas en aplicaciones agrícolas que las determinísticas, pues las primeras tienen en cuenta las perturbaciones aleatorias (cambios climáticos, efectos de plagas y enfermedades, que juegan un papel importante en las mediciones de eficiencia en este sector) y los errores en las mediciones en la variable producción y las segundas no. Esto motiva la idea de que las desviaciones de la frontera pueden no estar completamente bajo el control de la empresa estudiada (Reinhard, 1999).

Para la estimación de la Eficiencia Técnica, se utilizará la Medida Orientada a Producción<sup>10</sup> y no la Medida Orientada a Insumo<sup>11</sup>, pues como lo explica Reinhard (1999), la eficiencia técnica, bajo la primera orientación, implica eficiencia ambiental (y viceversa) bajo monotonidad débil; así la eficiencia ambiental puede ser alcanzada cuando hay altas o bajas relaciones entre los insumos a lo largo de la isocuanta. De lo contrario, no podría tratarse al insumo no convencional por sí solo (disminuirlo, por ejemplo), sino que tendría que tratarse a todos los insumos de igual manera; y si ha de reducirse alguno para alcanzar la eficiencia ambiental deberían, entonces, reducirse todos equiproporcionalmente (medida radial orientada a insumo). Ambas medidas coinciden para un productor técnicamente ineficiencia cuando la firma presenta rendimientos constantes a escala.

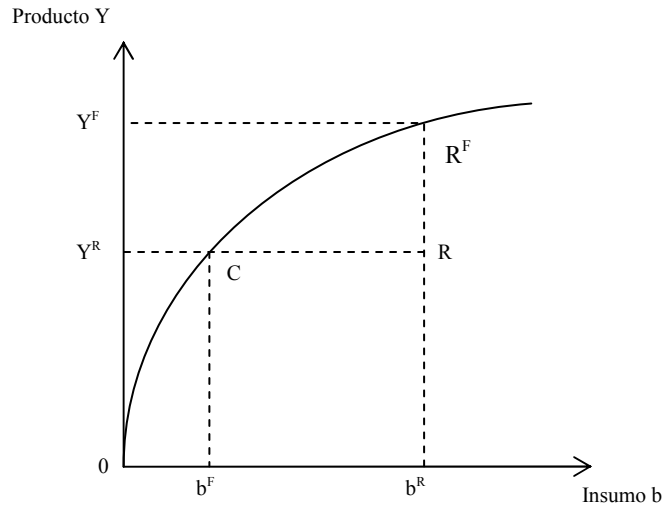
En la Figura 1, la firma emplea  $b^R$  y  $X$  como insumos en el proceso productivo (manteniendo  $X$  constante) para obtener  $Y^R$ . Este punto es ineficiente técnicamente, pues la producción de la firma se encuentra por debajo de la frontera de producción, pudiendo

---

<sup>10</sup> Significa que una firma es técnicamente eficiente si no puede producir más, dados unos insumos (Li y Cheng, 2004)

<sup>11</sup> Una firma es técnicamente ineficiente si ésta puede usar menos de algún(os) insumo(s), manteniendo la producción constantes (Li y Cheng, 2004).

producir  $Y^F$ , que es un punto técnicamente eficiente. La producción de la firma puede aumentarse dados estos insumos y, por ello, no es eficiente técnicamente.



Fuente: Reinhard, 1999

**Figura 1. Medida de Eficiencia Técnica Orientada a Producción**

Así, manteniendo los insumos constantes, se expande la producción de  $\theta Y^R$  a  $\theta Y^F$ , obteniéndose la Eficiencia Técnica:

$$ET_R = \max\{\phi : \phi Y_R \leq F(X_R, b_R)\}^{-1} = \frac{|\theta Y^R|}{|\theta Y^F|} \quad (3)$$

Siendo  $\phi$  la cantidad en la cual se va a aumentar la producción y donde  $Y^F$  es la producción máxima factible dados los insumos ( $0 \leq \phi \leq 1$ ).

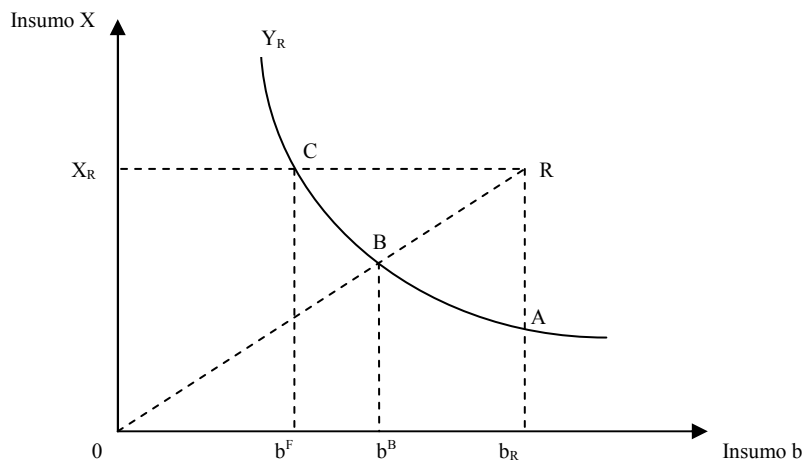
Por otro lado, la eficiencia ambiental, según Reinhard, Lovell y Thijssen (1999), puede definirse como la relación de la mínima cantidad factible usada de un insumo que deteriora el ambiente condicionada sobre niveles de bienes deseables observados y los insumos convencionales. Así definida, la eficiencia ambiental es una medida orientada a insumo no radial de eficiencia técnica (Srivastava, 2002).

Esta Orientación a Insumo es preferida a Producción, para el caso de la estimación de la Eficiencia Ambiental, por dos razones:

- i) la estimación de la frontera de producción estocástica sólo permite estimar un producto y no un vector de productos, que en este caso será la producción de arroz.
- ii) se pueden tener medidas cuantitativas de  $b$  (cantidad del insumo usado en el proceso productivo), pero los efectos ambientales no se puede medir en estos términos.

Si el insumo no convencional es utilizado adecuadamente y, por ende, no causa ningún daño al medio ambiente, la ineficiencia ambiental sería cero. Así, la eficiencia ambiental permitirá responder a la pregunta referente a en cuánto podría ser reducido el bien no deseado, sin sacrificar bienes deseables, adoptando las mejores prácticas tecnológicas.

En la Figura 2, se muestra la eficiencia ambiental en el espacio del insumo convencional  $X$  y el insumo que deteriora el ambiente  $b$  (insumo no convencional), manteniendo la producción constante en  $Y_R$ .



Fuente: Reinhard, Lovell y Thijssen (1999)

**Figura 2. Medida de Eficiencia Ambiental Orientada a Insumo**

$b^F$  es el mínimo uso factible del insumo que deteriora el ambiente, dada la tecnología y los valores del insumo convencional  $X_R$  y el bien  $Y_R$ . En el punto  $R$ ,  $Y_R$  es técnicamente ineficiente, desde que  $(X_R, b_R)$  están por arriba de la isocuanta  $Y_R$ . Por ello,

el punto ambientalmente eficiente se encuentra en el punto  $C$ , donde se utiliza la mínima cantidad factible del insumo que deteriora el ambiente y, además, éste se encuentre sobre la isocuanta.

Así, la Eficiencia Ambiental se define como la cantidad mínima en la que se puede reducir  $b_R$  para seguir obteniendo la misma o una mayor producción de  $Y_R$ , y puede expresarse como:

$$EA_R = \min\{\theta : F(X_R, \theta b_R) \geq Y_R\} = \frac{|0b^F|}{|0b_R|} \quad (4)$$

donde  $(0 \leq \theta \leq 1)$  y  $\theta$  es en cuánto puede reducirse ese insumo.

### 3.2 Modelo General

Sea  $i$  una unidad productora de arroz en el momento  $t$ . El modelo general de frontera estocástica de producción se puede expresar como:

$$Y_{it} = f(X_{it}, b_{it}; \beta) \exp(\varepsilon_{it}) \quad (5)$$

$$Y_{it} = f(X_{it}, b_{it}; \beta) \exp(V_{it} - U_i) \quad (6)$$

Donde:

$Y_{it}$ : vector de producción de arroz.

$f(\cdot)$ : función de producción.

$X_{it}$ : vector de insumos convencionales divididos en capital, trabajo y otros insumos.

$b_{it}$ : insumo no convencional.

$\beta$ : vector de parámetros de la tecnología a ser estimados.

$V_{it}$ : término del error aleatorio, i.i.d. como  $N(0, \sigma_v^2)$ , que captura aquellos shocks aleatorios que ocurren en el proceso productivo y que están más allá del control del productor.

$U_i$ : término del error que captura la ineficiencia técnica de la producción, i.i.d., no negativo de una distribución normal truncada (en cero) con media  $\mu_i$  y varianza  $\sigma_u^2$ .

Así, la frontera de producción estocástica está dada por la frontera de producción determinística  $f(X_{it}, b_{it}; \beta)$  y aquellos factores externos que influyen en el proceso de producción, incluyendo los efectos de ineficiencia de cada productor ( $\exp(V_{it} - U_i)$ ).

Como lo indican Ebersberger, Cantner y Hanusch (2000), la forma funcional ha sido especificada de antemano para alcanzar una frontera diferenciable; así la estimación de la frontera estocástica representa un método de estimación paramétrica. Por otra parte, el hecho de que  $U_i > 0$  garantiza que todas las observaciones estén sobre o por debajo de la frontera de producción estocástica (Kompas, 2002)

Es por ello que para el cálculo de la frontera, es necesario el cálculo de una función de producción de arroz. Para ello, se realizaron varias estimaciones con formas funcionales como Trascendental y Translogarítmica, escogiendo ésta última porque los datos se ajustaron mucho mejor y porque las variables de mayor importancia en el estudio tuvieron mayor relevancia.

Las pruebas para escoger la forma funcional más adecuada se limitaron a estas dos formas funcionales principalmente por tener elasticidades de producción variables y no constante, omitiendo, de esta manera la forma funcional tipo Cobb-Douglas. Esto se debe a que, como lo explican Reinhard, Lovell y Thijssen (1999), bajo ésta última las elasticidades de producción son constantes, con lo cual los rankings de los productores por la eficiencia ambiental serían idénticos a los de eficiencia técnica, y la primera no podría añadir información adicional. Así, si las elasticidades de producción son variables, ambas eficiencias podrían diferir y la eficiencia ambiental podrá dar información adicional.

Por otra parte, aún y cuando sea poco plausible asumir que la eficiencia técnica de los productores de arroz permanezca constante en el tiempo, porque el ambiente es competitivo y cambia constantemente, al usar un panel corto, es decir, para períodos pequeños de tiempo (en este caso para dos años) tiene sentido asumir que la eficiencia técnica sea invariante en el tiempo (Henderson, 2003). Es por ello, que la Eficiencia Técnica (ET), entonces, puede ser calculada de la siguiente manera a partir de la ecuación (6):

$$Y_{it} = f(X_{it}, b_{it}; \beta) \exp(V_{it}) \exp(-U_i) \quad (7)$$

De aquí, puede despejarse la ineficiencia técnica como:

$$ET_{it} = \frac{Y_{it}}{Y_{it}^*} = \frac{Y_{it}}{f(X_{it}, b_{it}; \beta) \exp(V_{it})} = \exp(-U_i) \quad (8)$$

donde  $Y_{it}$  representa la producción observada y  $Y_{it}^*$  corresponde a la producción en la frontera. Así,  $0 \leq \exp(-U_i) \leq 1$

Para el cálculo de la ineficiencia se utilizará una función de Máxima Verosimilitud, pues la mayor ventaja de estimar datos panel a través de ésta es que las unidades más eficientes adquieren una mayor influencia sobre los resultados de estimación que las menos eficientes, comparado con otros métodos de estimación para datos panel (Acevedo, 2004).

Además, asumiendo que los supuestos distribucionales y de independencia son razonables de acuerdo a los datos de panel a utilizar, máxima verosimilitud es factible, y  $U_i$  se aproximará como una normal truncada con media  $\mu$  y varianza  $\sigma_u^2$  (Battese y Coelli, 1993). A esto hay que añadir que cuando  $T \rightarrow \infty$ , la ineficiencia técnica de cada firma puede ser estimada consistentemente (Atkinson y Cornwell, 1993).

Cuando se estima un modelo de esta forma, lo que se obtiene es  $\tilde{\varepsilon}_{it} = y_{it} - f(x_{it}, \tilde{\beta})$  que puede ser considerado como el estimado del término del error  $\tilde{\varepsilon}_{it}$  (Jondrow *et al.*, 1982). Para resolver este inconveniente, como lo explican Lema y Delgado (1998), dado que los  $U_i$  son inobservables, una vez se conozcan los parámetros  $\beta$  de la frontera estocástica de producción, sólo la diferencia,  $\varepsilon_{it} = V_{it} - U_i$  puede ser observada. La mejor forma de predecir  $U_i$  es la esperanza condicional de  $U_i$ , dado el valor de  $V_{it} - U_i$ .

Así, Battese y Coelli (citado por Reinhard, Lovell y Thijssen, 2002) señalan que el mejor estimador de la eficiencia técnica es:

$$ET_i = E[\exp(-U_i)/(V_{it} - U_i)] = \frac{1 - \Phi(\sigma_* - \mu_{*i} / \sigma_*)}{1 - \Phi(-\mu_{*i} / \sigma_*)} \exp(-\mu_{*i} + \sigma_*^2 / 2) \quad (9)$$

Donde  $\sigma_* = \sigma_u \sigma_v / \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$ ,  $\mu_{*i} = [-(V_{it} - U_i)\sigma_u^2 + \mu\sigma_v^2] / (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$  y  $\Phi(\cdot)$  es la función de densidad de una variable aleatoria con distribución normal estándar. Los parámetros de la función de producción ( $\beta$ ), así como los parámetros del error  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  y  $\mu$ , son calculados por máxima verosimilitud. Así, una vez obtenidos éstos, se calcula  $\sigma_*$  y  $\mu_{*i}$  y se introducen en la ecuación (9), obteniéndose la eficiencia técnica.

Para la estimación de la eficiencia ambiental, se partió de la forma funcional translogarítmica (anteriormente escogida como la mejor forma funcional), y de la definición de eficiencia ambiental no-radial orientada a insumo, como lo plantearon Reinhard, Lovell y Thijssen (1999), obteniéndose (para detalles de la derivación, ver Anexo A):

$$LnEA_{it} = \frac{-\left(\beta_b + \sum_j \beta_{jb} LnX_{itj} + \beta_{bb} Ln b_{it}\right) \pm \sqrt{\left(\beta_b + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} LnX_{itj} + \beta_{bb} Ln b_{it}\right)^2 - (2\beta_{bb})(U_i)}}{\beta_{bb}} \quad (10)$$

De esta manera, y tomando en cuenta la parte positiva de la ecuación<sup>12</sup>, se hace el cálculo de la eficiencia ambiental para cada productor por medio de la ecuación (10).

Una vez obtenidas las eficiencias técnica y ambiental para cada tipo de sistema de cultivo, se procederá a analizar la influencia que tienen sobre estas algunas variables escogidas que representarán efectos específicos de cada agricultor. Este segundo análisis es de gran importancia, pues permitirá observar cómo se comportan las eficiencias ante estas variables y, de esta manera, utilizar los resultados para dar recomendaciones de política.

---

<sup>12</sup> Es esta parte de la ecuación la que se va a tomar en cuenta para el cálculo de la eficiencia ambiental y no la negativa porque como la eficiencia técnica implica eficiencia ambiental, entonces cuando  $U_i = 0$  entonces  $LnEA_{it} = 0$ , lo cual se cumple para la parte positiva (Reinhard, Lovell y Thijssen, 1999).

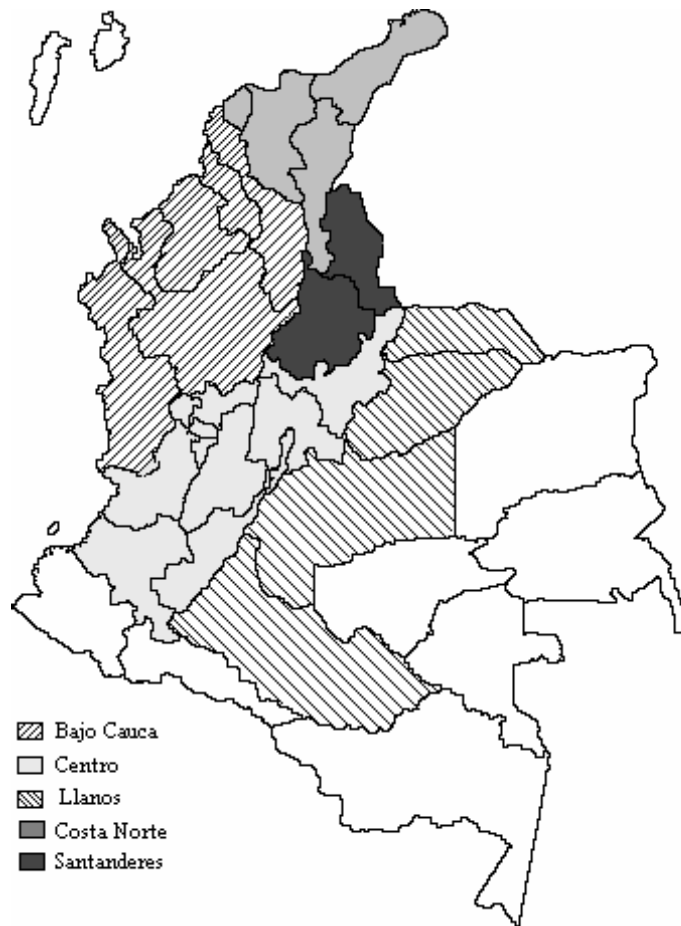
## 4. Metodología

### 4.1. Datos

Los datos fueron recaudados en el Censo Nacional Arrocerero, realizado por la Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), para los períodos 1999 y 2000, correspondiente al primer semestre de cada año. Todos los productores de arroz entrevistados (110 productores) se encuentran en ambos años, por lo que se trabaja con un panel balanceado. Para ello, las encuestas se estratificaron por zonas, cuyas características generales se describen a continuación (Fedearroz, 2001):

- i) *Bajo Cauca*: comprende los departamentos de Antioquia, Córdoba, Bolívar, Sucre y Chocó. El principal sistema de producción es el seco, tanto manual como mecanizado. Aquí se encuentra la mayoría de productores que destinan su producción a autoconsumo.
- ii) *Llanos*: comprende Arauca, Casanare, Caquetá y Meta. Por presentar precipitaciones de 3.000 mm al año presenta en su mayoría sistema de producción de seco, aunque se practican ambos sistemas de cultivo. Esta zona también ha experimentado un crecimiento en los últimos 10 años, tanto en el número de productores como en el área sembrada, en todos sus departamentos.
- iii) *Centro*: comprende Cundinamarca, Huila, Cauca, Tolima, Valle del Cauca y Nariño. Se siembra principalmente en el sistema de riego; por esto, y debido a que no depende de una régimen de lluvias, no hay mucha diferencia entre el área sembrada entre semestres. Los departamentos de mayor importancia se encuentran en Huila y Tolima, donde se encuentra la mayor concentración de la producción. Esto debido a que éstas experimentaron un crecimiento en las áreas cultivadas debido a la presencia de nuevas tierras o porque el impacto de la reforma agraria sustituyó la ganadería por arroz (caso de Campoalegre, Aípe y Agrado).





Fuente: Fedearroz, 2001.

**Figura 3. Mapa de las Zonas Arroceras de Colombia**

iv) *Costa Nor-Oriental:* comprende los departamentos de Guajira, Norte de Santander, Cesar y Magdalena. Esta zona incluye la Zona Santanderes, debido a que presentan condiciones similares. En esta zona, la producción de arroz ha perdido participación, debido a que como el arroz y el algodón son cultivos transitorios que se usan en rotación y ante la crisis aldonera sufrida, la siembra de arroz disminuyó. En la mayoría de los departamentos se usa el sistema de riego, exceptuando el departamento de Cesar que utilizan en su mayoría el sistema de secano.

Por otra parte, las encuestas tomaron en cuenta el grado de tecnificación mecanizado<sup>13</sup>, que se divide en Riego<sup>14</sup> y Secano Mecanizado<sup>15</sup>, diferenciado ambos por la disponibilidad de agua. También se tomó en cuenta el tipo de tenencia del agricultor (arrendatario y otros: propietarios, parceleros y colonos) y por último, el área de arroz sembrada, en la que se consideraron tres rangos: entre 0.01 y 3.0 has, entre 3.01 y 10.00 has, y más de 10 has. En la Tabla 1 se exponen las unidades y porcentajes a los que corresponde cada una de las variables en cada zona.

La mayoría de ellos poseen un área mayor a 10 ha. y practican el sistema de riego, exceptuando la zona de Bajo Cauca, quienes practican en su mayoría el sistema seco. La tenencia en la muestra es variada, encontrándose que en las zonas del Centro y la Costa la mayoría son propietarios de sus tierras y en las zonas restantes no lo son (Ver Anexo B).

Aún y cuando la encuesta con la cual se realizó el estudio no incluía variables como nivel educativo y edad de los productores que pudieran ser incorporadas en el modelo, es importante señalar cómo es el comportamiento de las mismas en cada zona. En cuanto a la edad de los productores, más del 50% se encuentran entre los 30 y los 50 años. La mayoría de los agricultores con edades entre los 20 y 29 años, se encuentran en la zona Bajo Cauca; en las zonas Costa Nor-Oriental y Centro están entre los 40 y 50 años y en los Llanos están entre los 30 y 40 años (Fedearroz, 2001).

En cuanto al nivel de escolaridad, los agricultores no superan la educación primaria, pues al culminar esta etapa se dedican al cultivo. El mayor número de analfabetas se encuentran en la zona del Bajo Cauca, en cambio las zonas Centro y Llanos presentan el mayor número de agricultores con estudios superiores (Fedearroz, 2001).

---

<sup>13</sup> Está integrado, en su mayoría, por agricultores que comercializan toda su producción.

<sup>14</sup> Aquel en el cual el agua que requiere el cultivo es provista por el hombre, es decir, tiene una fuente permanente de agua que se distribuye, en su mayoría, por gravedad.

<sup>15</sup> Depende del régimen de lluvias, por lo cual disponen de canales de drenaje para su utilización.

**Tabla 1. Descripción (Unitaria y Porcentual) de las Variables de Estratificación por Zonas**

| Variables de Estratificación | Zonas / Unidades (%) | Bajo Cauca<br>26 (23,6%) | Centro<br>28 (25,5%) | Llanos<br>30 (27,3%) | Costa<br>Nor-Oriental<br>26 (23,6%) | Total<br>110 (100%) |
|------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Tenencia                     | Propietario          | 12 (46,2%)               | 20 (71,4%)           | 12 (40%)             | 20 (76,9%)                          | 64 (58,2%)          |
|                              | Otros*               | 14 (53,9%)               | 8 (28,6%)            | 18 (60%)             | 6 (23,1%)                           | 46 (41,8%)          |
| Sistema                      | Riego                | 9 (34,6%)                | 28 (100%)            | 15 (50%)             | 26 (100%)                           | 78 (70,9%)          |
|                              | Secano               | 17 (65,4%)               | 0 (0%)               | 15 (50%)             | 0 (0%)                              | 32 (29,1%)          |
| Área                         | 0 – 3 ha.            | 0 (0%)                   | 9 (32,1%)            | 0 (0%)               | 0 (0%)                              | 9 (8,2%)            |
|                              | 3.01 – 10 ha.        | 9 (34,6%)                | 7 (25%)              | 1 (3,3%)             | 11 (42,3%)                          | 28 (25,5%)          |
|                              | Más de 10 ha.        | 17 (65,4%)               | 12 (42,9%)           | 29 (96,7%)           | 15 (57,7%)                          | 73 (66,4%)          |

\* Incluye arrendatarios, aparceros y colonos. Fuente: Propia, a partir de los datos del censo de Fedearroz.

## 4.2 Modelos Empíricos

### 4.2.1 Función de Producción Estocástica

A continuación se describirá el modelo cuyos parámetros serán estimados para medir la eficiencia técnica y ambiental de los productores de arroz en la zona de los Llanos, Bajo Cauca, Costa Nor-Oriental y Centro de Colombia.

Sea  $i$  una unidad productora de arroz, con  $N$  unidades productoras ( $i = 1, 2, \dots, N=110$ ) que conformarán el análisis, y  $t$  el tiempo en el que se llevará a cabo el estudio ( $t=1999, 2000$ ). Así, los modelos de frontera estocástica de producción se pueden expresar como:

- **Modelo 1:** Incluye el tipo de sistema como variable explicativa
- **Modelo 2:** Se estima un modelo para cada sistema productivo:
  - a) Sistema de Secano
  - b) Sistema de Riego

En todos los casos la especificación es:

$$\begin{aligned}
 \ln Rice_{it} = & \alpha_0 + \sum_j \alpha_j \ln X_{ij} + \delta_b \ln b_{it} + \frac{1}{2} \sum_j \sum_k \beta_{ik} \ln X_{ij} \ln X_{itk} + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} \ln X_{ij} b_{it} + \\
 & \frac{1}{2} \sum_j \beta_{ij} (\ln X_{ij})^2 + \frac{1}{2} \beta_{bb} (\ln b_{it})^2 + \eta_i \text{sistema} + V_{it} - U_i
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

donde:

- $LnRice_{it}$  : Logaritmo de la variable dependiente producción de arroz.
- $LnX_{ij}$  : Logaritmo de las variables de los grupos Factores, Trabajo, Capital, Insumos Convencionales.
- $Ln b_{it}$  : Logaritmo de la variable correspondiente al grupo de Insumo no Convencional (exceso de nitrógeno, en este caso).
- $LnX_{ij}LnX_{ik}$  : Interacciones de los logaritmos de las variables de los grupos Factores, Trabajo, Capital e Insumos Convencionales, exceptuando el grupo de Insumo no Convencional.
- $LnX_{ij}Ln b_{it}$  : Interacciones de los logaritmos de las variables de los grupos Factores, Trabajo, Capital, Insumos Convencionales con el grupo de Insumo no Convencional.
- $(LnX_{ij})^2$  : Logaritmo al cuadrado de las variables de los grupos Factores, Trabajo, Capital, Insumos Convencionales.
- $(Ln b_{it})^2$  : Logaritmo al cuadrado de la variable del grupo Insumo no Convencional.
- Sistema* : Variable dummy que representa el tipo de sistema de cultivo empleado.
- $V_{it}, U_i$  : Son los errores aleatorios y la eficiencia técnica, respectivamente.  $V_{it}$  i.i.d. como  $N(0, \sigma_v^2)$ .  $U_i$ : independiente de  $V_{it}$ , no negativo de una distribución normal truncada (en cero) con media  $\mu_i$  y varianza  $\sigma_u^2$ .

Estando *sistema* presente en el modelo 1, como una variable junto con los demás insumos que forman parte del proceso productivo y no en el 2. Para este segundo modelo, se dividirá la muestra según el tipo de sistema de cultivo que practiquen los agricultores para luego calcular una frontera estocástica para cada sistema.

Las variables que se van a utilizar para calcular las tres fronteras de producción estocástica se dividen en los grupos que se describen en la Tabla 2 (para estadísticas descriptivas, ver Anexo C).

**Tabla 2. Descripción de las Variables Usadas en el Modelo de Frontera Estocástica**

| <b>GRUPOS DE VARIABLE</b>     | <b>NOMBRE DE LA VARIABLE</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>UNIDADES</b> |
|-------------------------------|------------------------------|--|-----------------|
| <u>Factores</u>               | <i>Agua</i>                  | Cantidad de agua en litros por hectárea en el cultivo. No incluye el agua de lluvia.   | Lts/ha.         |
| <u>Trabajo</u>                | <i>Mohora</i>                | Total de horas en mano de obra contratada y familiar   | Horas/ha.       |
| <u>Capital</u>                | <i>Hormaqtto</i>             | Total de horas utilizadas en maquinaria  | Horas/ha.       |
| <u>Insumos Convencionales</u> | <i>Stquant</i>               | Cantidad de semillas usadas en la siembra  | Kg/ha           |
|                               | <i>Pert</i>                  | Cantidad de fósforo y potasio aplicado   | Kg/ha           |
|                               | <i>Plagui</i>                | Cantidad de herbicidas, insecticidas y fungicidas aplicados.   | Lts/ha          |
| <u>Insumo no Convencional</u> | <i>Nitroexc</i>              | Variable Proxy del exceso de nitrógeno aplicados en el cultivo de arroz  | Kg/ha           |
| <u>Sistema de Cultivo</u>     | <i>Sistema</i>               | Tipo de sistema de cultivo que el productor está empleando. Toma el valor de 1 si el sistema es de riego y 0 si el sistema es de secano. | 0/1             |

Fuente: Propia

El nitrógeno es la variable ambiental más relevante en la fijación del rendimiento en arroz, no sólo porque interviene en los procesos fisiológicos de la planta, sino también porque interviene en factores ambientales que el productor debe tomar en cuenta al momento de tomar decisiones (referente a su aplicación óptima) para poder obtener altos rendimientos con los menores impactos ambientales posibles (Jaramillo, Pulver y Duque, 2003). Los impactos ambientales causados por la mala aplicación de este insumo la eutroficación de la superficie de las aguas, lixiviación de nitratos a los acuíferos y la evaporación del nitrógeno como amonio, lo cual contribuye a la lluvia ácida.

Por otra parte, Jaramillo, Pulver y Duque (2003) manifiestan que cuando se analizan los sistemas productivos de algunas regiones de las zonas del Centro y de los Llanos, se evidencia que existen falencias respecto al manejo de la fertilización nitrogenada debido a la discrepancia entre los agricultores e investigadores respecto a la dosis, modo y épocas óptimas para su aplicación, para las cuales se obtienen mayores rendimientos del cultivo de arroz. Por estas razones, y por su importancia en el cultivo, se tomó el nitrógeno como un insumo relevante y su exceso como un insumo no convencional en la producción de arroz.

Para el cálculo del exceso de nitrógeno, se realizaron estimaciones que permitiera, con los datos utilizados, obtener óptimos técnicos de aplicación de nitrógeno para cada zona (Ver Anexo D). Esto se efectuó de esta manera por dos razones fundamentales:

- i) Los requerimientos de uso óptimo de fertilizantes dependen de la localidad, del clima, del tipo de suelo, el sistema de siembra, la densidad de siembra, etc., lo cual implica que no se pueden hacer recomendaciones generales en el uso de fertilizantes.
- ii) No se tiene información relacionada con la cantidad de nitrógeno que se pierde en la cosecha de arroz que permitiese aplicar la condición de balance de materiales.

Con estos óptimos, se procedió a construir la variable de insumo no convencional, como una variable Proxy del exceso de nitrógeno aplicado para cada zona de Colombia, obteniéndose a través de la diferencia entre lo que aplican y lo que en realidad deberían aplicar.

Las variables para el análisis de cómo varían las eficiencias según variables que representen el comportamiento de cada productor, se describen en la Tabla 3.

**Tabla 3. Descripción de las Variables Usadas para Analizar las Eficiencias**

| GRUPOS DE VARIABLE | NOMBRE DE LA VARIABLE | DESCRIPCIÓN  | UNID. |
|--------------------|-----------------------|--|-------|
| <u>Experiencia</u> | <i>Asist1</i>         | Variable dummy que muestra si el agricultor recibe o no asistencia técnica. Si reciben asistencia técnica toma un valor de 1, de lo contrario 0.   | 0/1   |
| <u>Capital</u>     | <i>Credi1a</i>        | Variable dummy que refleja si el productor tiene actualmente algún tipo de crédito, tomando, en este caso, el valor de 1 y 0 en caso contrario.  | 0/1   |
|                    | <i>Rango</i>          | Variable de estratificación que representa las hectáreas de tierra que posee el productor. Toma el valor de 1 si posee entre 3.01 y 10 ha., el valor de 2 si posee más de 10 ha. Y 0 en otro caso. | 0/1/2 |

Fuente: Censo de Fedearroz

Para las estadísticas descriptivas, ver el Anexo C.

A continuación, se presentan las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en el modelo de frontera separado por tipo de sistema de cultivo empleado (ver Tabla 4), que permitirán identificar el paquete tecnológico de un productor según el tipo de sistema de cultivo que practique.

**Tabla 4. Estadísticas Descriptivas de las Variables Utilizadas para la Estimación de la Frontera Estocástica para cada uno de los Tipos de Sistema de Cultivo**

| Variable                 | Secano |                     |        |        | Riego  |                     |        |        |
|--------------------------|--------|---------------------|--------|--------|--------|---------------------|--------|--------|
|                          | Media  | Desviación Estándar | Mínimo | Máximo | Media  | Desviación Estándar | Mínimo | Máximo |
| Arroz (Kg./ha.)          | 4,648  | 1164                | 1904   | 6813   | 6222.6 | 1272.9              | 1550   | 9531.3 |
| Agua riego (Lts./ha.)    | 0      | 0                   | 0      | 0      | 2701.8 | 3768.1              | 0      | 16848  |
| Mano de obra (Horas/ha.) | 42.9   | 24.7                | 12.58  | 102.7  | 89.7   | 53.4                | 0      | 246.6  |
| Semilla (Kg./ha.)        | 219.2  | 30.9                | 140    | 280    | 245.1  | 40.0                | 140    | 343.8  |
| Fertilizantes (Kg./ha.)  | 132.5  | 1163.4              | 2176   | 7037.5 | 112.0  | 1287.2              | 1763.5 | 9844.8 |
| Plaguicidas (Lts./ha.)   | 5.4    | 3.2                 | .23    | 12.8   | 5.3    | 2.6                 | .27    | 12.4   |
| Maquinaria (Horas/ha.)   | 8.2    | 2.4                 | 3.5    | 16.75  | 10.2   | 4.3                 | 3.1    | 30.5   |
| Nitrogeno (Kg./ha.)      | 78.5   | 34.3                | 0      | 157.5  | 150.9  | 58.2                | 37.4   | 330    |
| Exceso de N (Kg./ha.)    | 8.6    | 15.230              | 0      | 70.71  | 15.5   | 26.1                | 0      | 123.7  |

Cálculos: Propios a partir del censo de Fedearroz (2001).

Así mismo, se presentan en las Tablas 5 y 6 la estructura de costos de producción en los que incurren los productores según el tipo de sistema de cultivo empleado.

Los costos varían de un sistema a otro, aunque no muestran muchas diferencias a pesar de utilizar diferentes requerimientos en sus insumos. La mayor participación del gasto se da en los herbicidas, para ambos sistemas y en ambos años. Lo sigue las horas empleadas en maquinaria y la cantidad de semillas. El gasto en el insumo nitrógeno tiene el mayor porcentaje de participación dentro del rubro de fertilizantes.

**Tabla 5. Estructura de Costos de Producción (\$ /ha.) del Cultivo de Arroz para el Sistema de Secano**

| Concepto              | Unidades   | Año 1999 (Semestre A)          |                                      |                 | Año 2000 (Semestre A)          |                                      |                 |
|-----------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
|                       |            | Cantidad promedio por hectárea | Costo promedio por hectárea (\$/ha.) | % Participación | Cantidad promedio por hectárea | Costo promedio por hectárea (\$/ha.) | % Participación |
| <i>Trabajo</i>        |            |                                |                                      |                 |                                |                                      |                 |
| Mano de Obra          | Horas      | 49.7                           | 92,856.0                             | 6.5%            | 36.2                           | 118,991.5                            | 8.2%            |
| <i>Capital</i>        |            |                                |                                      |                 |                                |                                      |                 |
| Maquinaria            | Horas      | 8.3                            | 401,536.1                            | 28.2%           | 8                              | 372,029.5                            | 25.5%           |
| <i>Insumos</i>        |            |                                |                                      |                 |                                |                                      |                 |
| Agua                  | Lt.        | 0                              | 14,124.9                             | 1.0%            | 0                              | 19,714.2                             | 1.4%            |
| Semillas              | Kg.        | 213.3                          | 234,793.2                            | 16.5%           | 225.0                          | 223,553.1                            | 15.3%           |
| <i>Fertilizantes</i>  | <i>Kg.</i> | <i>186.6</i>                   | <i>210,250.58</i>                    | <i>14.8%</i>    | <i>211</i>                     | <i>244816.9</i>                      | <i>16.8%</i>    |
| Potasio               | Kg.        | 57.1                           | 43,657.75                            | 3.1%            | 67.6                           | 48,973.1                             | 3.4%            |
| Fósforo               | Kg.        | 25.2                           | 26,821.63                            | 1.9%            | 33.2                           | 32,062.6                             | 2.2%            |
| Nitrógeno             | Kg.        | 79.2                           | 91,479.9                             | 6.4%            | 78.0                           | 120,835.6                            | 8.3%            |
| Otros insumos         | Kg.        | 25.1                           | 48,291.3                             | 3.4%            | 32.2                           | 42,945.6                             | 2.9%            |
| <i>Plaguicidas</i>    | <i>Lt.</i> | <i>5.1</i>                     | <i>472,321.7</i>                     | <i>33.1%</i>    | <i>6.0</i>                     | <i>479,243.4</i>                     | <i>32.9%</i>    |
| Herbicidas            | Lt.        | 3.1                            | 318,682.9                            | 22.3%           | 3.3                            | 319,285.3                            | 21.9%           |
| Insecticidas          | Lt.        | 0.6                            | 52,239.7                             | 3.7%            | 0.7                            | 58,168.4                             | 4.0%            |
| Fungicidas            | Lt.        | 1.4                            | 101,399.1                            | 7.1%            | 2.0                            | 101,789.7                            | 7.0%            |
| <i>Costos Totales</i> |            |                                | <i>1'425.882.5</i>                   | <i>100.0%</i>   | <i>1'458.348.6</i>             |                                      | <i>100.0%</i>   |

Cálculos: Propios a partir de los datos del censo de Fedearroz (2001)

**Tabla 6. Estructura de Costos de Producción del Cultivo de Arroz para el Sistema de Riego (\$/ha.)**

| Concepto              | Unidades   | Año 1999 (Semestre A)          |                                      |                 | Año 2000 (Semestre A)          |                                      |                 |
|-----------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
|                       |            | Cantidad promedio por hectárea | Costo promedio por hectárea (\$/ha.) | % Participación | Cantidad promedio por hectárea | Costo promedio por hectárea (\$/ha.) | % Participación |
| <i>Trabajo</i>        |            |                                |                                      |                 |                                |                                      |                 |
| Mano de Obra          | Horas      | 75.1                           | 118,738.2                            | 8.0%            | 104.2                          | 114,183.4                            | 8.2%            |
| <i>Capital</i>        |            |                                |                                      |                 |                                |                                      |                 |
| Maquinaria            | Horas      | 10.0                           | 369,672.7                            | 24.9%           | 10.4                           | 383,385.3                            | 27.4%           |
| <i>Insumos</i>        |            |                                |                                      |                 |                                |                                      |                 |
| Agua                  | Lt.        | 1,124.8                        | 20,085.6                             | 1.4%            | 4,278.9                        | 16,662.3                             | 1.2%            |
| Semillas              | Kg.        | 250.5                          | 246,813.0                            | 16.6%           | 239.7                          | 230,085.5                            | 16.5%           |
| <i>Fertilizantes</i>  | <i>Kg.</i> | <i>273.7</i>                   | <i>238,698.1</i>                     | <i>16.2%</i>    | <i>262.4</i>                   | <i>206,835.3</i>                     | <i>14.8%</i>    |
| Potasio               | Kg.        | 60.9                           | 48,678.4                             | 3.3%            | 56.1                           | 42,154.2                             | 3.0%            |
| Fósforo               | Kg.        | 35.1                           | 32,210.6                             | 2.2%            | 31.2                           | 30,487.5                             | 2.2%            |
| Nitrógeno             | Kg.        | 149.0                          | 106,012.9                            | 7.2%            | 153.0                          | 108,253.6                            | 7.7%            |
| Otros insumos         | Kg.        | 28.7                           | 51,796.2                             | 3.5%            | 22.1                           | 25,940.0                             | 1.9%            |
| <i>Plaguicidas</i>    | <i>Lt.</i> | <i>5.6</i>                     | <i>488,685.0</i>                     | <i>32.9%</i>    | <i>5.0</i>                     | <i>447,312.4</i>                     | <i>31.9%</i>    |
| Herbicidas            | Lt.        | 3.1                            | 325,419.8                            | 21.9%           | 3.2                            | 309,509.5                            | 22.1%           |
| Insecticidas          | Lt.        | 0.8                            | 57,792.7                             | 3.9%            | 0.6                            | 49,086.2                             | 3.5%            |
| Fungicidas            | Lt.        | 1.7                            | 105,472.5                            | 7.1%            | 1.2                            | 88,716.7                             | 6.3%            |
| <i>Costos Totales</i> |            |                                | <i>1'482,692.6</i>                   | <i>100.0%</i>   | <i>1'398,464.2</i>             |                                      | <i>100.0%</i>   |

Cálculos: Propios a partir de los datos del censo de Fedearroz (2001)



Por otra parte, los resultados muestran que, aunque el sistema de secano utilice únicamente el agua de lluvia en la producción del cultivo (de la cual no se tiene información), hay un gasto correspondiente a este insumo, el cual no se puede atribuir a su utilización en el proceso productivo, puesto que la cantidad de agua utilizado para el mismo es nula como se reporta en las estadísticas descriptivas.

## **5. Resultados**

Se realizó la estimación de las fronteras estocásticas de producción para los productores de arroz de Colombia, obteniéndose tanto la eficiencia técnica como la ambiental.

### **5.1 Frontera Estocástica de Producción**

Se efectuó la estimación de la eficiencia técnica a través del cálculo de la frontera estocástica. Para el modelo conjunto (todos los productores), los resultados se resumen en la Tabla 7.

Los resultados obtenidos se limitan al rango de productores observados. Así, la variable *Innitrex*, que representa el insumo no convencional, es significativa y negativa, lo que indica que a medida que el uso de nitrógeno se incrementa en un 1% por encima de su óptimo técnico, la producción de arroz disminuirá en un 0,85% aproximadamente.

Las variables que representan la interacción entre el insumo convencional semillas y el exceso de nitrógeno y entre mano de obra y semilla resultaron significativas y positivas. Esta asociación positiva implica que, *ceteris paribus* y dados los rangos de uso reportados en la muestra, estas parejas de insumos pueden ser consideradas como insumos complementarios en la función de producción. Sin embargo, se debe aclarar que las relaciones de complementariedad (o sustitución) no implican causalidad en el uso de los insumos. Por el contrario, lo que se observa es que para la muestra analizada el uso de estos insumos mostró una correlación positiva (o negativa). Así, si se quiere sembrar una mayor cantidad de semillas, se necesitará más horas en mano de obra para llevar esta práctica a cabo. Por otra parte, si se aumenta la cantidad

de semillas, debe aumentarse la cantidad de nitrógeno aplicado para aumentar el rendimiento de las mismas.

**Tabla 7. Parámetros Estimados para el Modelo Conjunto a través de la Frontera Estocástica de Producción<sup>16</sup>**

| Parámetros                          | Coefficiente Estimado (p-value) | Desviación Estándar | Parámetros  | Coefficiente Estimado (p-value) | Desviación Estándar |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------|---|---------------------------------|---------------------|
| <i>Variable Dependiente: lnrice</i> |                                 |                     |   |                                 |                     |
| <i>lnnitrex</i>                     | -.846<br>(0.002)                | .278                | <i>Lnag21</i>   | .012<br>(0.090)                 | .007                |
| <i>lnagmq1</i>                      | -0.071<br>(0.002)               | 0.023               | <i>lnmoh21</i>  | -.145<br>(0.053)                | .075                |
| <i>lnmostq1</i>                     | .483<br>(0.050)                 | 0.246               | <i>Lnfert21</i>   | .050<br>(0.000)                 | .012                |
| <i>lnmonit1</i>                     | -.074<br>(0.006)                | .027                | <i>sistema</i>  | .336<br>(0.000)                 | .050                |
| <i>lnstnit1</i>                     | 0.292<br>(0.005)                | 0.104               | <i>constante</i>  | 13.039<br>(0.001)               | 4.090               |
| <i>mu</i>                           | -141.739<br>(0.936)             | 1762.701            | <i>sigma2</i>   | 19.792                          | 245.248             |
| <i>lnsigma2</i>                     | 2.985<br>(0.810)                | 12.391              | <i>gamma</i>  | .999                            | .013                |
| <i>ilgtgamma</i>                    | 6.859<br>(0.580)                | 12.404              | <i>sigma_u2</i>   | 19.771                          | 245.248             |
|                                     |                                 |                     | <i>sigma_v2</i>   | .021                            | .003                |
| <i>Log likelihood = 62.938</i>      |                                 |                     | <i>Wald chi2(36) = 237.62</i><br><i>Prob&gt;chi2 = 0.0000</i> |                                 |                     |

Nota: Se exponen aquellas variables que son significativas al menos al 10%<sup>17</sup>. Fuente: Propia

Las variables de interacción entre mano de obra y exceso de nitrógeno y entre agua y maquinaria resultaron significativas y negativas, mostrando que estos insumos son sustitutos entre sí o, en otras palabras, que hay una asociación negativa entre estos insumos. Por ejemplo, para el caso entre mano de obra y exceso de nitrógeno, esta asociación se puede interpretar como que al aumentar el uso de nitrógeno, la cantidad de malezas en la cosecha de arroz puede disminuir, por lo que la utilización de horas en mano de obra para este fin podría ser menor. Así mismo, si el terreno se encuentra en

<sup>16</sup> Las estimaciones de los parámetros a través de la frontera estocástica para los tres modelos, se realizaron usando el programa STATA 8.0.

<sup>17</sup> Para observar todos los parámetros de la frontera estocástica, ver el Anexo E.

condiciones óptimas de humedad se podría necesitar menos cantidad de horas de maquinaria para preparar el terreno para la siembra.

La variable que refleja si el productor lleva a cabo el sistema de cultivo de riego o de secano, resultó positiva y relevante, lo cual indica que el sistema de cultivo de riego contribuye a aumentar la producción por presenta menos riesgo para el productor que lleva a cabo esta práctica, comparado con el otro sistema de cultivo<sup>18</sup>.

### 5.1.1 Eficiencia Técnica para el Modelo Conjunto

El parámetro  $\gamma$ <sup>19</sup> mide la desviación de la producción de la frontera, que se atribuye a la ineficiencia técnica (Batesse y Corra, 1977)<sup>20</sup>. A través de máxima verosimilitud, se obtuvo un valor de 0.999, lo cual indica que la mayor parte de la desviación de la producción de la frontera se debe a la ineficiencia técnica<sup>21</sup>.

Por otra parte, la eficiencia técnica se encuentra en el rango entre cero y uno, siendo valores altos los que representan mayores grados de eficiencia técnica de los agricultores. La eficiencia técnica no varía de un período a otro (debido al supuesto de invariante en el tiempo). La media calculada, para el modelo conjunto, es de 0.878 (Ver Tabla 8) y los valores mínimos y máximos son 0.434 y 0.964, respectivamente, lo que puede observarse en el Figura 4. Esto significa que algunos productores podrían aún incrementar la producción de arroz considerablemente.

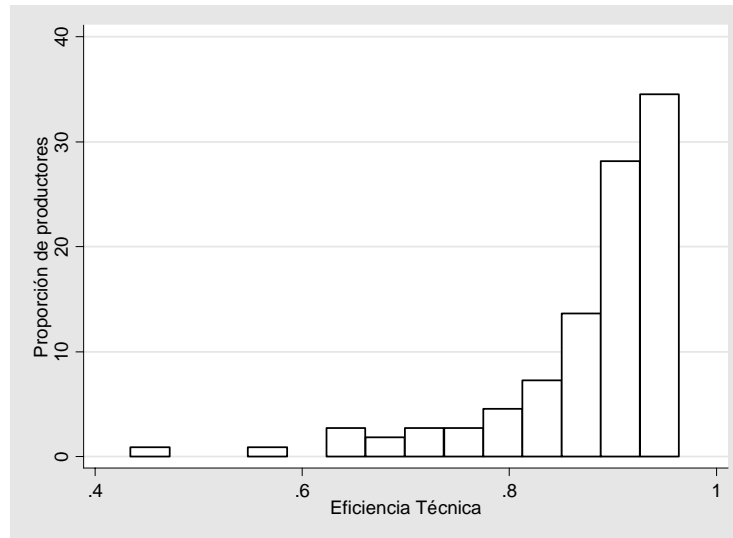
---

<sup>18</sup> La diferencia entre estas prácticas no sólo se basa en la diferencia en la disponibilidad del insumo agua, sino también en el riesgo que estos sistemas de cultivo representan para el agricultor; presentando el sistema de secano un mayor riesgo para el productor que el sistema de riego, por su dependencia a un régimen de lluvias.

<sup>19</sup>  $\gamma = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_s^2}$ , donde  $\sigma_s^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$

<sup>20</sup> Citado por Ojo, 2003.

<sup>21</sup> Si  $\gamma=0$ , entonces el modelo sería equivalente un modelo tradicional de producción, donde  $U_i = 0$  y pudiese ser estimado a través de Mínimos Cuadrados Ordinarios



Fuente: Propia

**Figura 4. Histograma de Frecuencia de la Eficiencia Técnica para el Modelo Conjunto**

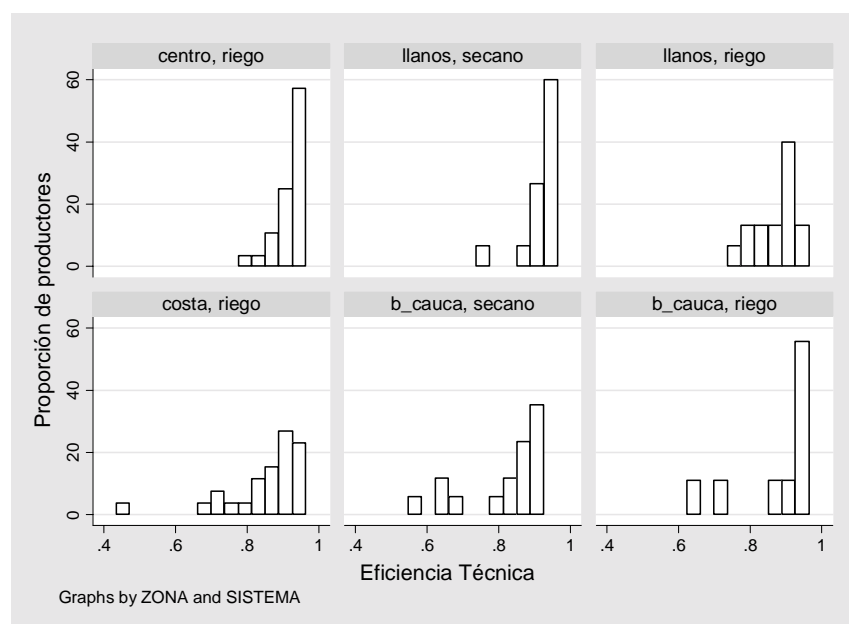
El 54,6% de la muestra presenta niveles de eficiencia técnica superiores a 0.9 y sólo el 0,9% presenta niveles de eficiencia técnica inferiores a 0.5. Por otra parte, viendo el comportamiento de las eficiencias técnicas de los productores por zona, se tiene que el 75% de los agricultores pertenecientes a la zona del Centro, presentan niveles superiores al 90%; para la zona de los Llanos, los presentan el 60% de los productores; para la zona de la Costa el 38.4% y para la zona del Bajo Cauca el 42.3% (para más detalle ver Anexo F).

Si se supone que la diferencia entre sistemas depende solamente de la variable dummy (*sistema*), se puede analizar la eficiencia técnica para cada sistema de cultivo. Aunque las diferencias entre las medias de la eficiencia técnica entre un sistema de cultivo y otro no resultaron estadísticamente significativas ( $p\text{-value} = 0.2085$ ) (es decir, las medias de eficiencia técnica para el sistema de secano y el sistema de riego son iguales), si existen para los promedios de eficiencia técnica entre cada zona (ver Tabla 8).

**Tabla 8. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Técnica para el Modelo Conjunto**

| Zona       | Obs. | Eficiencia Técnica         |                |      |      |                           |                |      |      |   |                |      |      |
|------------|------|----------------------------|----------------|------|------|---------------------------|----------------|------|------|---|----------------|------|------|
|            |      | Secano<br>(32 productores) |                |      |      | Riego<br>(78 productores) |                |      |      | Promedio Ponderado<br>(110 productores) |                |      |      |
|            |      | Media                      | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                     | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                                   | Desv. Estándar | Mín. | Máx. |
| Centro     | 28   | -                          | -              | -    | -    | .916                      | .040           | .794 | .957 | .916                                    | .040           | .794 | .957 |
| Llanos     | 30   | .923***                    | .051           | .759 | .964 | .874***                   | .056           | .773 | .953 | .898                                    | .058           | .759 | .964 |
| Costa      | 26   | -                          | -              | -    | -    | .849                      | .114           | .434 | .958 | .849                                    | .114           | .434 | .958 |
| Bajo Cauca | 26   | .824*                      | .116           | .578 | .925 | .878*                     | .117           | .635 | .959 | .843                                    | .118           | .578 | .959 |
| TOTAL      | 110  | .870                       | .103           | .579 | .964 | .881                      | .088           | .434 | .959 | .878                                    | .093           | .434 | .964 |

\*\*\* Significancia al 1% y \* al 10%. Fuente: Propia



Fuente: Propia

**Figura 5. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para el Modelo Conjunto**

Así para la zona de los Llanos, aquellos productores que practican el sistema de secano son, en promedio, más eficientes técnicamente (0.923) que aquellos que practican el sistema de riego (0.874)<sup>22</sup>, resultado atribuible a que, para los años el estudio,

<sup>22</sup> Con un p-value = 0.0004

las precipitaciones anuales de la zona fueron muy beneficiosas para estos productores lo que, unido a una buena utilización de sus insumos, hicieron que sus eficiencias técnicas promedio sean mayores para este sistema de cultivo (ver Figura 5).

En la zona del Bajo Cauca, los agricultores que llevan a cabo el sistema de riego son, en promedio, más eficientes técnicamente (0.878) que los que practican el sistema de secano (0.824)<sup>23</sup>, posiblemente a que usan adecuadamente sus insumos ante un sistema de cultivo más tecnificado y de menos riesgo (ver Figura 5).

### **5.1.2 Eficiencia Técnica para los Modelos Separados por Tipo de Sistema**

El supuesto de que las diferencias entre los dos sistemas productivos (riego y secano) dependen únicamente de una variable dummy, puede ser fuerte si se espera que la combinación de insumos y factores sean diferentes en cada uno de estos sistemas. Para evaluar las implicaciones del supuesto, se calcularon, para cada sistema de cultivo por separado, la Frontera Estocástica de Producción y los niveles de eficiencia técnica y ambiental. Los parámetros que se obtuvieron para cada estimación se resumen en la Tabla 9.

Para el modelo del sistema de riego, la variable que representa el exceso de nitrógeno resultó significativa y con signo negativo, lo cual indica que un uso de este insumo por encima del valor óptimo, desde el punto de vista técnico, hará que la producción de arroz disminuya cuando el sistema utilizado es el de riego. Para el modelo del sistema de secano, esta variable no resultó significativa estadísticamente (aunque si se obtuvo el signo esperado), lo que indica que si el sistema de cultivo llevado a cabo es el de secano, no es relevante el impacto por el uso de este insumo, debido a que los productores pueden ser más cuidadosos en su aplicación por el tipo de sistema empleado.

---

<sup>23</sup> Con un p-value = 0.0567

**Tabla 9. Parámetros Estimados para los Modelos de Secano y de Riego<sup>24</sup>**

| Sistema de Secano                   |                                    |                        | Sistema de Riego                    |                                    |                        |
|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Parámetros                          | Coefficiente Estimado<br>(p-value) | Desviación<br>Estándar | Parámetros                          | Coefficiente Estimado<br>(p-value) | Desviación<br>Estándar |
| <i>Variable Dependiente: lnrice</i> |                                    |                        | <i>Variable Dependiente: lnrice</i> |                                    |                        |
| <i>lnstquant</i>                    | -32.416<br>(0.008)                 | 12.228                 | <i>lnstquant</i>                    | 3.433<br>(0.074)                   | 1.920                  |
| <i>lnfert</i>                       | -2.594<br>(0.009)                  | .993                   | <i>lnmohora</i>                     | -1.933<br>(0.018)                  | .817                   |
| <i>lnplagui</i>                     | -5.292<br>(0.001)                  | 1.592                  | <i>lnnitrex</i>                     | -.577<br>(0.059)                   | .305                   |
| <i>lnhorma</i>                      | -19.326<br>(0.001)                 | 5.603                  | <i>lnagpla1</i>                     | .043<br>(0.003)                    | .015                   |
| <i>lnmofe1</i>                      | -.227<br>(0.031)                   | .105                   | <i>lnagmq1</i>                      | -.065<br>(0.005)                   | .023                   |
| <i>lnstfer1</i>                     | .769<br>(0.025)                    | .343                   | <i>lnmostq1</i>                     | .801<br>(0.007)                    | .295                   |
| <i>lnstpla1</i>                     | 1.893<br>(0.000)                   | .535                   | <i>lnmonit1</i>                     | -.110<br>(0.000)                   | .029                   |
| <i>lnstmaq1</i>                     | 5.417<br>(0.002)                   | 1.776                  | <i>lnstmit1</i>                     | .225<br>(0.046)                    | .113                   |
| <i>lnfern1</i>                      | .0779<br>(0.011)                   | .031                   | <i>lnmqnit1</i>                     | .103<br>(0.047)                    | .052                   |
| <i>lnfermq1</i>                     | .670<br>(0.009)                    | .257                   | <i>lnag21</i>                       | .014<br>(0.028)                    | .006                   |
| <i>lnstq21</i>                      | 4.269<br>(0.041)                   | 2.099                  | <i>lnstq21</i>                      | -7.761<br>(0.005)                  | .269                   |
| <i>lnmoh21</i>                      | .421<br>(0.048)                    | .213                   | <i>lnmoh21</i>                      | -.138<br>(0.096)                   | .083                   |
| <i>lnfert21</i>                     | .053<br>(0.000)                    | .015                   |                                     |                                    |                        |
| <i>lnplag21</i>                     | -.218<br>(0.025)                   | .098                   | <i>lnplag21</i>                     | .137<br>(0.099)                    | .083                   |
| <i>lnhmaq21</i>                     | 1.392<br>(0.014)                   | .569                   |                                     |                                    |                        |
| <i>Const</i>                        | 130.575<br>(0.001)                 | 37.905                 |                                     |                                    |                        |
|                                     |                                    |                        |                                     |                                    |                        |
| <i>Mu</i>                           | -173.543                           |                        | <i>mu</i>                           | -169.908                           |                        |
| <i>lnsigma2</i>                     | 3.067<br>(0.000)                   | .009                   | <i>lnsigma2</i>                     | 3.022<br>(0.000)                   | .006                   |
| <i>ilgtgamma</i>                    | 7.674<br>(0.000)                   | .230                   | <i>ilgtgamma</i>                    | 7.129<br>(0.000)                   | .146                   |
| <i>Sigma2</i>                       | 21.484                             | 0.203                  | <i>sigma2</i>                       | 20.538                             | 0.124                  |
| <i>gamma</i>                        | .999                               | .000                   | <i>gamma</i>                        | .999                               | .000                   |
| <i>sigma_u2</i>                     | 21.474                             | 0.203                  | <i>sigma_u2</i>                     | 20.521                             | 0.124                  |
| <i>sigma_v2</i>                     | .010                               | .002                   | <i>sigma_v2</i>                     | .016                               | .002                   |
|                                     |                                    |                        |                                     |                                    |                        |
|                                     | <i>Log likelihood = 36.799</i>     |                        |                                     | <i>Log likelihood = 63.622</i>     |                        |
|                                     | <i>Wald chi2(27) = 206.84</i>      |                        |                                     | <i>Wald chi2(27) = 137.28</i>      |                        |
|                                     | <i>Prob &gt; chi2 = 0.000</i>      |                        |                                     | <i>Prob &gt; chi2 = 0.000</i>      |                        |

Fuente: Propia<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Se exponen aquellas variables que son significativas, por lo menos, al 10%

La variable que representa la cantidad de semilla a utilizar resultó, para ambos modelos, significativa pero con signo contrario: para el modelo de secano, la variable presenta un signo negativo y para el modelo de riego un signo positivo. Esto se puede explicar en el hecho de que aquellos que llevan a cabo sistemas de riego tienen un control sobre la cantidad de agua que aplican en sus cultivos de arroz y, por lo tanto, pueden saber la cantidad apropiada de semilla para obtener los rendimientos esperados. Por otra parte, aquellos que practican sistemas de secano, por no tener control sobre la cantidad de agua aplicada en sus cultivos, no pueden hacer un uso excesivo del insumo semilla, pues estarían disminuyendo sus rendimientos en el cultivo al mantener uno de los insumos constante (agua) y el otro no (semilla); o, por otra parte, al sembrar una gran cantidad de semillas, podría producir competencia entre las plantas, por espacio, luz, fertilizantes, etc. lo que haría que la calidad del suelo disminuyera y, por lo tanto, se produjera una disminución en el rendimiento de las plantas, haciendo que la producción de arroz se viera disminuida.

Para el modelo de secano, las variables que representan los fertilizantes, los plaguicidas y la cantidad de horas empleadas en maquinaria, resultaron relevantes y negativas, por lo que, en el rango de productores observado, al aumentar su uso por encima de las dosis requeridas, puede disminuir la producción de arroz.

La variable de interacción entre la mano de obra y los fertilizantes resultó significativa y negativa, por lo que estos insumos serían sustitutos entre sí o habría una asociación negativa entre ellos. Puesto que al aumentar el uso de fertilizantes disminuye el crecimiento de malezas que hace que las horas de mano de obra utilizadas para este fin disminuyan también.

Las variables de interacción entre la cantidad de semillas y los fertilizantes, semilla y plaguicidas y semilla y cantidad de horas empleada en maquinaria, resultaron relevantes y positivas, así como las interacciones entre los fertilizantes y el exceso de nitrógeno y los fertilizantes y la cantidad de horas usadas de maquinaria, mostrando que existe una asociación positiva entre estos insumos o que son complementarios entre sí.

---

<sup>25</sup> Para observar todos los parámetros de la frontera estocástica, ver el Anexo G.



Si la cantidad de semillas aumenta, debe aumentarse la cantidad de fertilizantes y de plaguicidas para obtener un buen nivel de rendimientos con niveles de infestación (de plagas, de malezas, etc.) bajos en el cultivo; si se van a sembrar más cantidad de semillas, se necesitan más horas de utilización de maquinaria para preparar el terreno.

Para el modelo de riego, la variable que representa la cantidad de horas de mano de obra utilizadas, resultó significativa y negativa mostrando que, para este rango de productores, al aumentar la cantidad en horas de mano de obra, la producción de arroz disminuiría, posiblemente a rendimientos marginales decrecientes en etapa III de producción. Por otra parte, las variables de interacción entre la cantidad de agua y los plaguicidas, entre mano de obra y cantidad de semilla, entre la cantidad de semilla y el exceso de nitrógeno y entre el uso de maquinaria y el exceso de nitrógeno, resultaron relevantes y positivas, por lo que estos insumos muestran una asociación positiva.

Las variables de interacción entre el agua y las horas en maquinaria y entre la mano de obra y el exceso de nitrógeno, resultaron relevantes y negativas, por lo que hay una asociación negativa entre estos insumos o, por otra parte, se comportan como sustitutos entre sí.

Comparando los tres modelos, las variables que resultaron relevantes en el modelo conjunto resultaron relevantes en el modelo de riego, coincidiendo en los signos pero no en magnitudes. El modelo de secano presentó relevancia en variables diferentes a la de los otros dos modelos, debido posiblemente a que el sistema de secano es menos tecnificado y el cultivo depende de un régimen de lluvias, por lo que lo hace más sensible al uso de otros insumos para obtener rendimientos.

En cuanto a la eficiencia técnica para los modelos por sistema, se presenta un resumen de los resultados en la Tabla 10 y en el Figura 6.

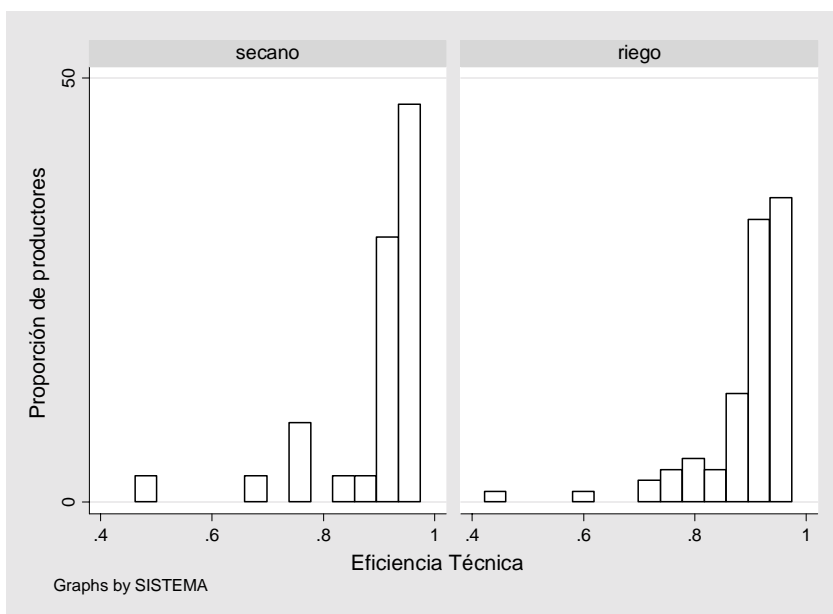
La eficiencia técnica se presenta con una media de 0.893, teniendo valores mínimos y máximos de 0.422 y 0.975, respectivamente (ver Tabla 10). La diferencia entre las medias totales de eficiencia técnica para cada tipo de sistema empleado no resultó significativa ( $p\text{-value} = 0.4645$ ), al igual que las diferencias de medias correspondientes a la zona del Bajo Cauca ( $p\text{-value} = 0.4764$ ); pero sí para la zona de los Llanos ( $p\text{-value} = 0.0639$ ). En esta zona, los agricultores que llevan a cabo el sistema de

secano son, en promedio, más eficientes técnicamente (0.921) que aquellos que llevan a cabo el sistema de riego (0.903) (ver Tabla 10).

**Tabla 10. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Técnica para los Modelos por Sistema**

| Zona       | Obs. | Eficiencia Técnica         |                |      |      |                           |                |      |      |   |                |      |      |
|------------|------|----------------------------|----------------|------|------|---------------------------|----------------|------|------|---|----------------|------|------|
|            |      | Secano<br>(32 productores) |                |      |      | Riego<br>(78 productores) |                |      |      | Promedio Ponderado<br>(110 productores) |                |      |      |
|            |      | Media                      | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                     | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                                   | Desv. Estándar | Mín. | Máx. |
| Centro     | 28   | -                          | -              | -    | -    | .926                      | .035           | .816 | .968 | .926                                    | .035           | .816 | .968 |
| Llanos     | 30   | .921*                      | .044           | .776 | .965 | .903*                     | .047           | .800 | .960 | .912                                    | .046           | .776 | .965 |
| Costa      | 26   | -                          | -              | -    | -    | .864                      | .113           | .422 | .962 | .864                                    | .113           | .422 | .962 |
| Bajo Cauca | 26   | .868                       | .130           | .479 | .975 | .865                      | .127           | .594 | .957 | .867                                    | .128           | .479 | .975 |
| TOTAL      | 110  | .893                       | .102           | .479 | .975 | .894                      | .087           | .422 | .968 | .893                                    | .092           | .422 | .975 |

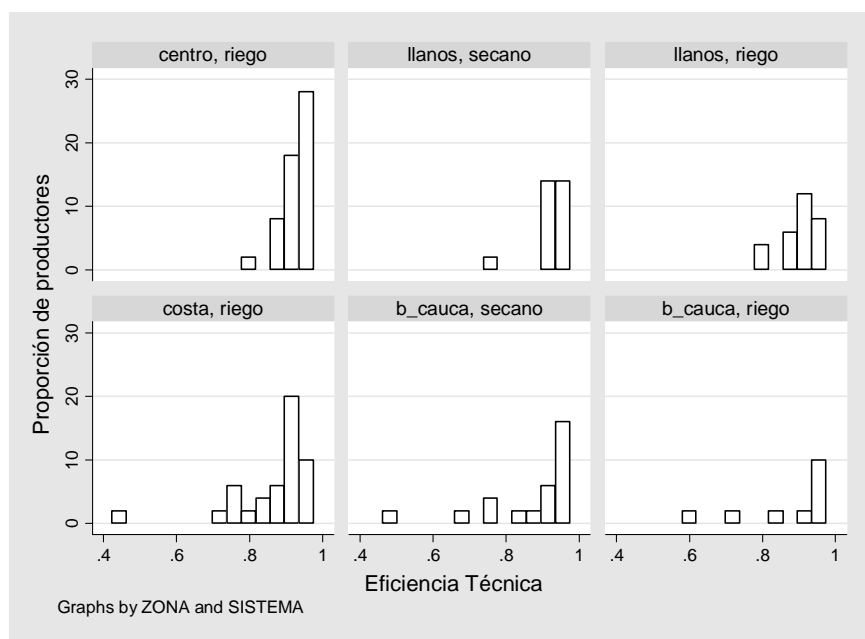
\*Significancia al 10%. Fuente: Propia



Fuente: Propia

**Figura 6. Rangos de Eficiencia Técnica para el Modelo por Sistemas**

Por otra parte, el 78,6% de los productores pertenecientes a la zona del Centro tienen niveles de eficiencia superiores a 0.9, atribuible a que en esta zona se encuentran los productores con más experiencia (observado a través de la edad, utilizada como una variable proxy de la experiencia) que hace que utilicen sus insumos de manera adecuada en el proceso productivo (utilizando a su vez un sistema más tecnificado), lo que les permite estar más cerca de su frontera de producción (ver Anexo F). Luego le siguen las zonas de los Llanos (el 73,3%), Bajo Cauca (el 57,7%) y la Costa (el 53,9%) la cual, a pesar de utilizar el sistema de riego en su proceso productivo, pueden no estar haciendo un uso eficiente de sus insumos, lo que hace que el hecho de que utilicen un sistema de cultivo más tecnificado no sea suficiente para que sus niveles de eficiencia técnicas sean tan altas comparadas con las otras zonas (ver Figura 7).



Fuente: Propia

**Figura 7. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para el Modelo por Sistemas**

Por otra parte, comparando los resultados de eficiencia técnica obtenidos en el modelo conjunto y en los modelos por sistemas, se puede observar, en general, que en estos últimos la eficiencia muestra niveles un poco más altos (en promedio) que en el

primer modelo. Esto puede deberse a que las fronteras estimadas para cada tipo de sistema capturan características no observables de la tecnología de cada productor que se pierden en el modelo conjunto haciendo que, para éste, los niveles de eficiencia sean un poco menores. También podría señalarse que la estimación conjunta castiga a algunos productores eficientes de un sistema (probablemente seco) cuando se analiza todo en conjunto debido a que en este modelo la variable que representa el tipo de sistema empelado en el cultivo de arroz dio significativa y positiva, haciendo que la producción aumente cuando éste se practique (para mayor detalle, ver tablas y gráficos del Anexo F).

Cuando se comparan los dos enfoques por zonas, se observa que para los casos de Centro y Costa (que solo tienen sistemas de riego) los promedios de eficiencia técnica son mayores cuando se usan los modelos separados por sistema, lo que puede mostrar que los altos niveles de eficiencia técnica de estas dos zonas se estaban perdiendo en el modelo conjunto. La zona de los Llanos, que usa los dos sistemas, muestra que el sistema de seco es más eficiente que el sistema de riego en cualquiera de los modelos. Sin embargo, las diferencias en eficiencia son menores cuando la estimación se hace por separado.

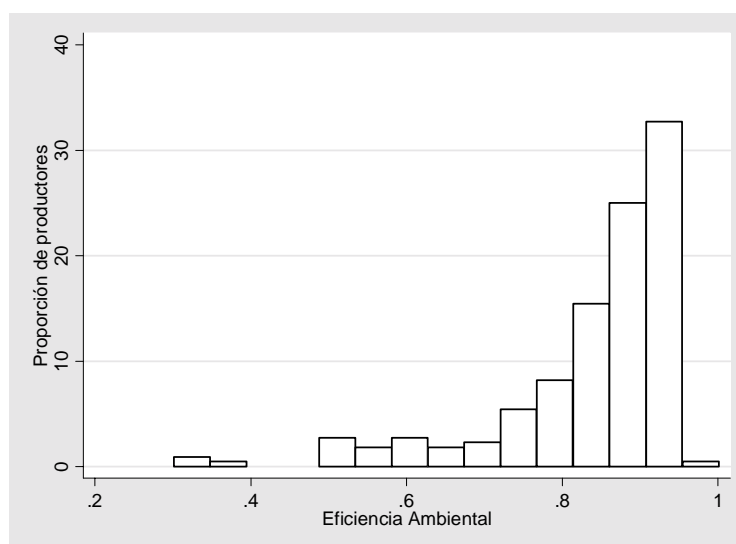
La zona del Bajo Cauca muestra resultados un poco ambiguos. En la estimación conjunta el sistema de riego muestra un promedio de eficiencia más alto que el de seco. En la estimación por separado, los valores son muy cercanos, siendo el sistema de seco el que muestra promedios de eficiencia más altos. Estos resultados llevan a pensar que las estimaciones por sistemas separados pueden ser más precisas, especialmente cuando el análisis se hace por zonas.

### **5.1.3 Eficiencia Ambiental para el Modelo Conjunto**

Para el cálculo de la eficiencia ambiental se procedió a aplicar la fórmula (10), sustituyendo los respectivos parámetros encontrados en la estimación de la frontera estocástica de los tres modelos, junto con los valores de las variables y el término  $U_i$  correspondiente a cada productor.

Se observa un nivel total promedio de eficiencia ambiental de 0.839, con valores mínimos y máximos de 0.301 y 0.954, respectivamente (ver Tabla 11 y Figura 8). Para

este modelo, y analizando la eficiencia ambiental, se puede observar que las diferencias entre los promedios totales de eficiencia ambiental para cada sistema de cultivo no resultaron estadísticamente significativas ( $p\text{-value} = 0.1382$ ), pero sí entre las zonas de estudio (ver Tabla 11).



Fuente: Propia

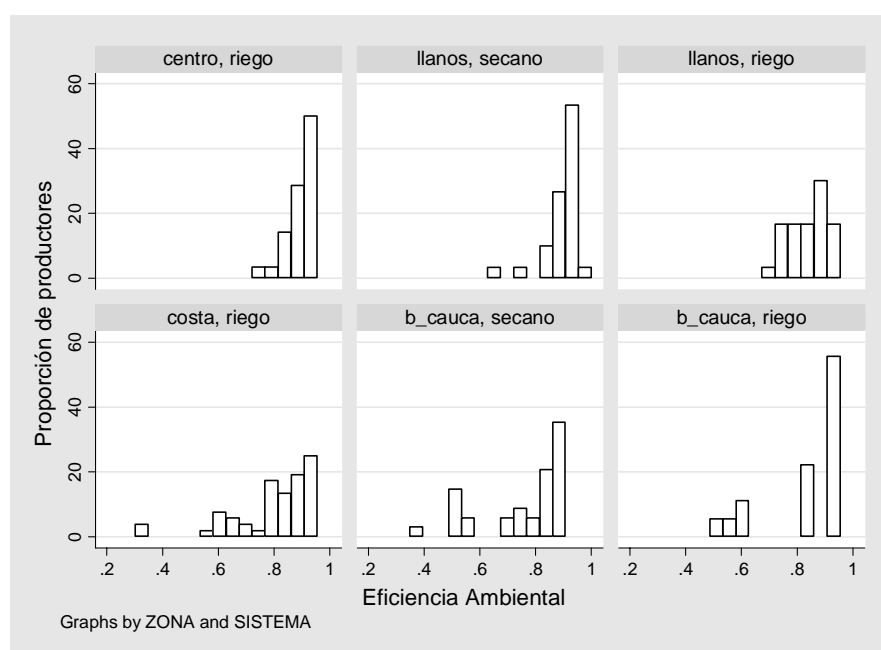
**Figura 8. Histograma de Frecuencia de Eficiencia Ambiental para el Modelo Conjunto**

**Tabla 11. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Ambiental para el Modelo Conjunto**

| Zona       | Obs. | Eficiencia Ambiental    |                |      |      |                        |                |      |      |                                      |                |      |      |
|------------|------|-------------------------|----------------|------|------|------------------------|----------------|------|------|--------------------------------------|----------------|------|------|
|            |      | Secano (32 productores) |                |      |      | Riego (78 productores) |                |      |      | Promedio Ponderado (110 productores) |                |      |      |
|            |      | Media                   | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                  | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                                | Desv. Estándar | Mín. | Máx. |
| Centro     | 28   | -                       | -              | -    | -    | .893                   | .048           | .734 | .948 | .893                                 | .047           | .734 | .948 |
| Llanos     | 30   | .900***                 | .66            | .665 | .954 | .836***                | .068           | .721 | .933 | .868                                 | .074           | .665 | .954 |
| Costa      | 26   | -                       | -              | -    | -    | .800                   | .146           | .301 | .950 | .800                                 | .146           | .301 | .950 |
| Bajo Cauca | 26   | .758*                   | .155           | .357 | .900 | .833*                  | .155           | .496 | .945 | .784                                 | .157           | .357 | .945 |
| TOTAL      | 110  | .825                    | .140           | .357 | .954 | .844                   | .113           | .301 | .950 | .839                                 | .122           | .301 | .954 |

\*\*\* Significancia al 1% y \* al 10%. Fuente: Propia

En la zona de las Llanos, los productores que llevan a cabo el sistema de secano son, en promedio, más eficientes ambientalmente (0.900) que aquellos que practican el sistema de riego (0.836)<sup>26</sup>. Esto puede atribuirse a que, como este sistema representa un mayor riesgo llevarlo a cabo para el productor, la utilización de nitrógeno y de los otros fertilizantes y agroquímicos será mas cuidadosa, además, en sistema de secano los productores tienden a usar nitrógeno en forma más mesurada que los productores bajo riego (ver Figura 9).



Fuente: Propia

**Figura 9. Rangos de Eficiencia Ambiental por Zonas para el Modelo Conjunto**

La zona del Bajo Cauca arrojó resultados contrarios, siendo más eficientes ambientalmente aquellos que practican riego (0.833) que los que practican secano (0.758)<sup>27</sup>, lo que hace suponer que en esta región el hecho de que se practique un sistema de cultivo más tecnificado no tiene un impacto negativo sobre el medio ambiente por utilizar sus insumos de manera más eficiente (ver Figura 9).

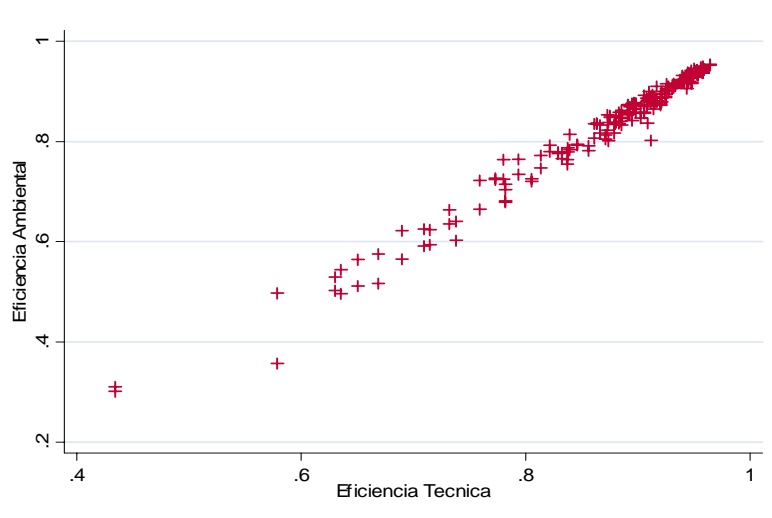
<sup>26</sup> Con un p-value = 0.0002.

<sup>27</sup> Con un p-value = 0.0507

Por otra parte, los resultados obtenidos para el modelo conjunto, muestran que la eficiencia ambiental presentan variabilidad en sus estimados, comparados con los estimados de eficiencia técnica (ver Anexo H), siendo un poco menos eficientes ambiental que técnicamente (encontrándose agricultores con niveles de eficiencia ambiental menores al valor mínimo de eficiencia técnica –ver Tablas 8 y 11).

Los niveles de eficiencia técnica y ambiental muestran que mientras 99 productores presentan eficiencias técnicas altas, superiores e iguales a 0.8 (el 84,6%), sólo 84 productores (el 76,4%) se encuentran en este rango de eficiencia ambiental (Ver Anexo H). De igual manera, mientras solo 1 productor presenta eficiencias técnicas bajas, menores e iguales a 0.5 (el 0,9%), 2 productores (el 1,8%) presentan eficiencias ambientales bajas, en promedio.

Aunque los resultados muestran que los productores son, en promedio, un poco más eficientes técnica que ambientalmente, se observa una relación positiva entre ambas, pero manteniéndose en cada productor, por lo general, niveles de eficiencia técnica mayores (Ver Figura 10).



Fuente: Propia

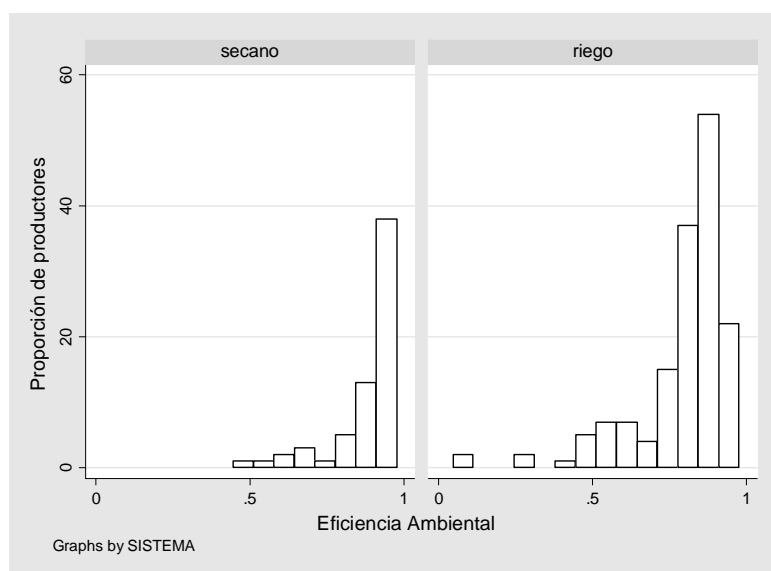
**Figura 10. Comparación de los Valores de Eficiencia Técnica y de Eficiencia Ambiental para cada Productor en el Modelo Conjunto**

Ahora, comparando los niveles de eficiencia técnica y ambiental por zonas para el modelo conjunto, se obtuvo que en la zona del Bajo Cauca los productores presentan,

en promedio, los menores niveles de eficiencia tanto técnica como ambiental comparado con las eficiencias de los productores de las demás zonas (Ver Tablas 8 y 11). Posiblemente a que en esta zona se encuentran los productores con menos experiencia (vista a través de la variable proxy edad) y, por ello, no usan eficientemente sus insumos.

#### 5.1.4 Eficiencia Ambiental para los Modelos por Tipo de Sistema

Los resultados obtenidos para estos modelos, se presentan en la Tabla 12. Se observa que la eficiencia promedio es de alrededor 0.82, con valores mínimos y máximos de 0.047 y 0.976, respectivamente (Ver Figura 11).



Fuente: Propia

**Figura 11. Histograma de Frecuencia de Eficiencia Ambiental para los Modelos por Sistema de Cultivo**

En este modelo, las diferencias entre los promedios totales de eficiencia técnica para cada sistema de cultivo resultaron estadísticamente significativas ( $p\text{-value} = 0.0000$ ), lo cual indica que existen diferencias en los promedios de eficiencia ambiental según el tipo de sistema que se practique. Los productores que practican el sistema de secano resultaron, en promedio, más eficientes ambientalmente (0.882) que los que practican el sistema de riego (0.791), lo cual se puede atribuir a que al ser el primero un sistema que



implica mayor riesgo para el productor este tiene mayor precaución al aplicar los insumos que causan contaminación; resultado que se sustenta con los obtenidos en los estimados de la frontera. Las variables plaguicidas y fertilizantes resultaron negativas, por lo tanto, tienen un impacto negativo en la producción cuando se aumenta su uso, para este rango observado de productores.

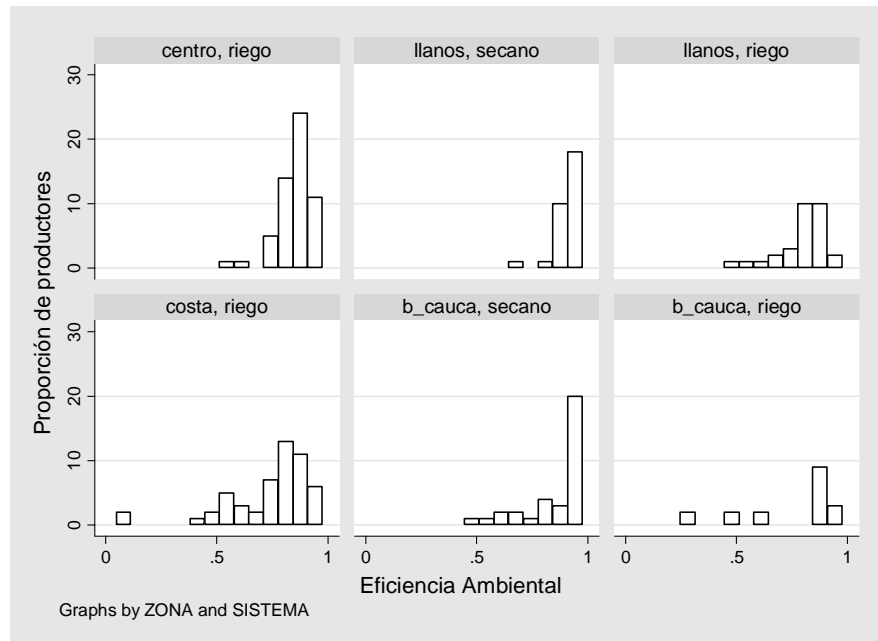
**Tabla 12. Estadísticas Descriptivas de Eficiencia Ambiental para el Modelo de Sistemas**

| Zona              | Obs. | Eficiencia Ambiental    |                |      |      |                        |                |      |      |                                      |                |      |      |
|-------------------|------|-------------------------|----------------|------|------|------------------------|----------------|------|------|--------------------------------------|----------------|------|------|
|                   |      | Secano (32 productores) |                |      |      | Riego (78 productores) |                |      |      | Promedio Ponderado (110 productores) |                |      |      |
|                   |      | Media                   | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                  | Desv. Estándar | Mín. | Máx. | Media                                | Desv. Estándar | Mín. | Máx. |
| <i>Centro</i>     | 28   | -                       | -              | -    | -    | .849                   | .074           | .548 | .941 | .849                                 | .074           | .548 | .941 |
| <i>Llanos</i>     | 30   | .909***                 | .054           | .696 | .960 | .801***                | .105           | .509 | .931 | .855                                 | .099           | .509 | .960 |
| <i>Costa</i>      | 26   | -                       | -              | -    | -    | .739                   | .191           | .047 | .928 | .739                                 | .191           | .047 | .928 |
| <i>Bajo Cauca</i> | 26   | .859**                  | .135           | .488 | .976 | .748**                 | .228           | .262 | .922 | .820                                 | .179           | .262 | .976 |
| <i>TOTAL</i>      | 110  | .882***                 | .108           | .488 | .976 | .791***                | .155           | .047 | .941 | .818                                 | .199           | .047 | .976 |

\*\*\* Significancia la 1%, \*\* al 5% y \* al 10%. Fuente: Propia

Por otra parte, en la zona de los Llanos y del Bajo Cauca, las diferencias en el promedio de las eficiencias ambientales por tipo de sistema practicado, resultaron significativas estadísticamente<sup>28</sup>; haciendo que, en ambas zonas, el sistema de secano tenga los mayores promedios de eficiencia ambiental (Llanos: secano=0.909, riego=0.801; Bajo cauca: secano=0.859, riego=0.748) (ver Figura 12).

<sup>28</sup> Llanos: p-value = 0.0000, Bajo Cauca: p-value = 0.0161

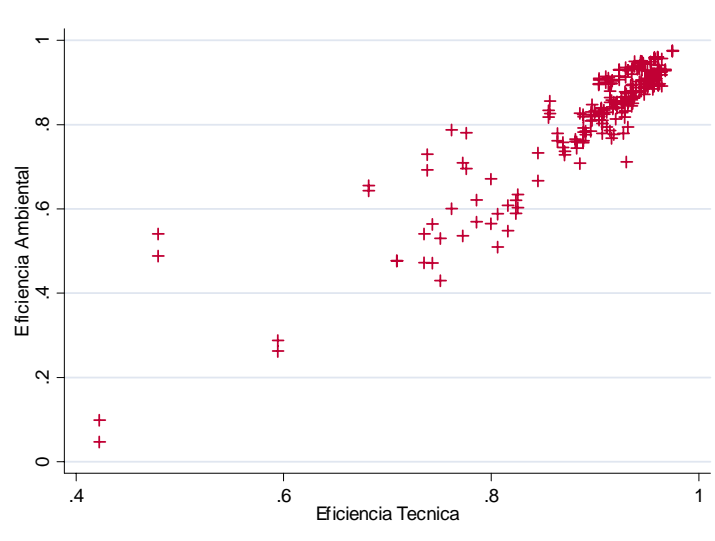


Fuente: Propia

**Figura 12. Rangos de Eficiencia Ambiental por Zonas para el Modelo por Sistemas**

Ahora, comparando las 4 zonas de estudio, se observa que, en promedio, la zona de los Llanos presenta los niveles de eficiencia ambiental más altos (0.855), lo que equivale a que el 80% de los productores tengan niveles de eficiencia mayores a 0.8. Lo sigue la zona del Centro (promedio de 0.849), donde el 96.4% de los productores tienen niveles mayores a 0.8; la zona del bajo Cauca (promedio 0.820), con el 65.3% de los productores con rangos de eficiencia mayores a 0.8 y, por último, la zona de la Costa (promedio 0.739), lo que equivale a que el 80.7% tenga rangos de eficiencia mayores a 0.7 (ver Tabla 12 y anexo H).

Comparando, en este modelo, las eficiencias técnicas y ambientales, se observa la misma tendencia que en el modelo conjunto y aunque se obtuvieron promedios de eficiencia técnica, en general, mayores que la ambiental, la relación positiva entre ambas se mantiene (ver Figura 13).



Fuente: Propia

**Figura 13. Comparación de los Valores de Eficiencia Técnica y de Eficiencia Ambiental para cada Productor en el Modelo por Sistemas**

La comparación entre los dos métodos de estimación muestra que, en general, usando estimaciones por sistemas separados la eficiencia ambiental promedio es un poco menor que cuando se usa la estimación conjunta.

Cuando se comparan los dos sistemas productivos, dado que en el modelo conjunto no hay diferencia en las medias y en el modelo por sistemas sí, se observa que las eficiencias calculadas con el modelo conjunto eran menores para los productores bajo sistema de secano que cuando se calculan con los modelos por separado. El sistema de riego resultó ser, en promedio, más eficiente en la estimación conjunta, es decir, la estimación por separado arroja valores más extremos entre sistemas, sugiriendo que en la estimación conjunta la estimación estaba suavizada para cada sistema. Si se acepta esta inferencia, se puede decir que la estimación por separado es la correcta, permitiendo una clara diferenciación de los resultados para cada sistema empleado que en el modelo conjunto no se hace y además se observa que ésta última estaba premiando el sistema de riego y castigando el sistema de secano.

## 5.2 Fuentes de Ineficiencia Técnica y Ambiental

Tratando de entender un poco mejor las fuentes de ineficiencia, tanto técnica como ambiental, se analiza el desempeño de las unidades productoras de acuerdo a estas variables de interés (Ver Anexo I)

*Uso de Crédito:* En el caso del modelo conjunto, aquellos que no han solicitado ningún tipo de crédito presentan, en promedio, mayores niveles en ambas eficiencias (88,5% de eficiencia técnica y 85,2% de eficiencia ambiental) comparados con aquellos que si lo han hecho (87,7% de eficiencia técnica y 83,7% de eficiencia ambiental). Esto se puede explicar en el hecho de que quienes lo solicitan son aquellos productores que entran y salen del mercado, más itinerantes y, por lo tanto, menos cuidadosos; en cambio quienes no lo solicitan son aquellos productores más tradicionales, que permanecen por mucho más tiempo o han permanecido toda su vida cultivando arroz y, por lo tanto, son más cuidadosos.

En los modelos por sistema, los resultados concuerdan con los obtenidos en el modelo conjunto, variando un poco en los promedios de ambas eficiencias.

*Área en Producción:* En el modelo conjunto, la variable que representa el número de hectáreas que posee el productor, muestra que, en promedio, aquellos que se encuentran en rangos menores de 3 hectáreas son más eficientes técnica y ambientalmente (90% y 87,3%, respectivamente) que productores con mayores áreas. Esto podría indicar que las eficiencias técnica y ambiental tienen rendimientos decrecientes a escala y que los productores pequeños tienen más habilidad para ser eficientes técnica y ambientalmente al usar de manera más eficiente sus insumos. Es importante notar que la mayor ineficiencia se presenta en el rango de 3.01 a 10 ha., posiblemente a que los productores que se encuentran en este rango son arrendatarios de las tierras y, por lo tanto, menos cuidadosos.

Para los modelos por sistema, los resultados muestran que, en promedio, aquellos que se encuentran en rangos menores de 3 hectáreas son más eficientes (91,5%) que los otros productores que tienen entre 3.01 y 10 ha. y más de 10 ha. (85,2% y 90,7%, respectivamente), aunque las diferencias no sean tan marcadas como en el caso del modelo conjunto. En cuanto a los niveles de eficiencia ambiental, aquellos que tienen

más de 10 ha. son, en promedio, más eficientes (84,9%) que aquellos que tienen menor área. Esto puede deberse al hecho de que, al ser menos eficientes técnica que ambientalmente, estén usando la cantidad de insumos adecuados para evitar un deterioro ambiental pero que no les permite alcanzar niveles de eficiencia técnica mayores.

*Uso de Asistencia Técnica:* En el modelo conjunto, la variable que refleja si el productor recibe o no asistencia técnica muestra que, aquellos productores que la reciben muestran, en promedio, niveles más altos en ambas eficiencias (88,4% y 84,6% para la eficiencia técnica y ambiental, respectivamente) que aquellos que no la reciben (84,4% y 82%, respectivamente). Esto se puede atribuir al hecho de que aquellos agricultores que solicitan asistencia técnica pueden estar informados y actualizados acerca de los nuevos requerimientos del cultivo, referentes a la cantidad de agua o al uso de otros insumos como fertilizantes, y pueden recibir recomendaciones referentes a sus propios cultivos, lo que les permite tener mayores niveles tanto de eficiencia técnica como ambiental.

Para los modelos por sistema, esta variable muestra similares resultados a los que del modelo conjunto, variando un poco los promedios en ambas eficiencias.

## **6. Conclusiones y Recomendaciones**

En el presente trabajo se estimó la Eficiencia Técnica de 110 productores de 4 zonas de Colombia, para datos panel balanceados correspondientes al primer semestre de los años 1999 y 2000, a través de la metodología de Frontera Estocástica de Producción, obteniéndose ésta por medio del segundo término que compone el error. Así mismo, se estimó la Eficiencia Ambiental como función de los parámetros obtenidos en esta etapa de estimación y que identifica a aquellos productores que tienen más o menos grados de contaminación sobre el ambiente, a través de la construcción de una variable proxy del exceso en el uso de nitrógeno llamada insumo no convencional.

Se calcularon ambas eficiencias (técnica y ambiental) para tres modelos de frontera: Modelo Conjunto y Modelo por Sistemas. Los resultados en los modelos Conjunto y de Riego muestran que la variable que representa el exceso de nitrógeno

tiene gran importancia dentro de la producción de arroz. Las variables que resultaron relevantes en estos modelos coinciden en relevancia y en signo, debido al resultado que se obtuvo de la variable que representa el tipo de sistema en el modelo conjunto, lo que hace que aquellos productores que practican el sistema de riego sean significativamente diferentes en comparación con aquellos que practican el sistema de secano. Por ello, los requerimientos de insumos para el modelo de secano son diferentes. Así, el supuesto de que las diferencias entre los dos sistemas productivos (riego y secano) dependen únicamente de una variable dummy, pudo ser corroborado al obtener estimaciones más precisas y resultados más fiables para el modelo separado por tipo de sistema.

En cuanto a la eficiencia técnica se observa variabilidad en los resultados entre el modelo conjunto y los modelos por sistema, siendo en el segundo modelo más eficiente técnicamente que en el primero (en promedio). Los resultados de la eficiencia ambiental, por su parte, muestran que a pesar de que sus niveles, en general, presentan variabilidad entre los modelos hay una disminución en los niveles de la misma del modelo conjunto al modelo por sistemas. También se pudo observar que hay una buena transferencia de tecnología de los productores más eficientes a los menos eficientes por parte de la Federación, haciendo que haya una mayor concentración en los niveles de eficiencia más altos.

Comparando ambas eficiencias, la eficiencia ambiental es más variable que la eficiencia técnica y presenta en promedio valores más bajos, pero mantienen (en ambos modelos) una correlación positiva. Los sistemas de secano parecen ser más eficientes ambientalmente que los sistemas de riego (los cuales son técnicamente más eficientes). Así mismo, se observó una mayor dispersión en los resultados obtenidos a través del sistema de secano que en el de riego atribuido a que, el primero, es más riesgoso para el productor por depender de un sistema de lluvias.

No se observan problemas graves en las eficiencias técnica y ambiental de los productores de arroz pertenecientes a la zonas del Centro, Llanos, Costa y Bajo Cauca de Colombia, mostrando niveles promedio de eficiencias altos en ambos casos.

Luego, se analizó el comportamiento tanto de la eficiencia técnica como de la ambiental ante algunas variables representativas de cada productor para cada modelo de

frontera estimado. Las diferencias de los resultados entre éstos no fue muy significativa, obteniéndose los mismo resultados (excepto para la variable rango), con pequeñas variaciones en los porcentajes.

Por último, y como recomendaciones, se puede aportar lo siguiente:

- Estimar, con este mismo enfoque, la frontera de producción para efectos que varían en el tiempo y comparar esos resultados con los obtenidos en este trabajo, a fin de analizar si esto hace que influya, de manera significativa, en los resultados.
- Complementar el estudio incluyendo más años en la muestra, pues sólo se tomaron en cuenta dos años y por ello no es fácil aislar los efectos producidos por variables climáticas. Así mismo, incluir datos socioeconómicos de los productores, a fin de tener mayor información que ayude a analizar los problemas de ineficiencia técnica y ambiental con mayor precisión.
- Implementar posibles regulaciones en el uso de fertilizantes y agroquímicos que sean amigables ambientalmente, a fin de que los productores puedan tener un menor impacto sobre el medio ambiente, les permita estar sobre la frontera técnica-ambiental eficiente. Dichas regulaciones deben tomar en consideración las características específicas de cada zona, como tipo de clima, suelo, etc.
- Debido a que la asistencia técnica influye de manera positiva sobre las eficiencias de los productores que la reciben, sería conveniente incentivar dicha actividad. Esto podría guiarlos a usar de manera más eficiente sus insumos y no sólo a mejorar su rendimiento, sino también a que tengan menos impactos nocivos sobre el medio ambiente.
- Ampliar dicho estudio incorporando, en el mismo, otros insumos no convencionales como el exceso de potasio, exceso de fósforo y/o exceso de agroquímicos, tomando en cuenta el impacto que éstos pueden tener sobre el medio ambiente, y analizar el comportamiento de la eficiencia ambiental ante esta variante.

## 7. Bibliografía

- Acevedo, M.C. (2004). Diferencias Regionales en la Eficiencia Técnica del Sector Confecciones en Colombia: Un Análisis de Fronteras Estocásticas. Tesis de la facultad de Economía. *Universidad de los Andes*. 2004.
- Aguirre M., J.C., Peña T., J y Cerda D., R. (2002). Fronteras Estocásticas, Eficiencia Técnica y Escalas de Operación en Pesca Demersal (Pesquería de Merluza Común en Chile). Recuperado de <http://www2.udec.cl/enech2002/paper28.pdf>. Agosto, 2002.
- Asmild, M. y Hougaard L. J. (2002). Economic and Environmental Efficiency of Danish Pig Farms. Recuperado de: <http://www19.uniovi.es/7ewepa/pdf/enveff.pdf>.
- Atkinson, S.E. y Cornwell, C. (1993). Measuring Technical Efficiency with Panel Data. *Journal of Econometrics*. Vol. 59. No. 3. pp. 257-261. Oct, 1993.
- Battese, G. E. y Coelli, T. J. (1993). A Stochastic Frontier Production Function Incorporating a Model for Technical Inefficiency Effects. *Working Papers in Econometrics and Applied Statistics*. No. 69. October, 1993.
- Bauer, P. W. (1990). Recent Developments in the Econometric Estimation of Frontiers. *Journal of Econometrics*. Vol. 46. No. 1-2. Octubre-Noviembre, 1990. pp. 39-56.
- Bayacag, P. y Rola, A. (2001). Farm Environment, Farmer Knowledge and Technical Efficiency: An Investigation about Upland Corn Farmers in Bukidnon, Philippines. *SANREM/SEA Conference, ACCEED*. Makati, Philippines. May 28-30, 2001.
- Ebersberger, B., Cantner, U. y Hanusch, H. (2000). Analyzing Inefficiency Using a Frontier Search Approach. Recuperado de: <http://www.wiwi.uni-augsburg.de/vwl/institut/paper/199.pdf> Diciembre, 2000.
- FAO, 2003. Secretaría del Año Internacional del Arroz. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Año Internacional del Arroz. Documento Base. Publicado en Octubre de 2003. Recuperado de <http://www.fao.org/rice2004/es/f-sheet/concept.pdf>.



- Fedearroz, 2000. II Censo Nacional Arrocerero. Cubrimiento Cosecha 1999 A-B. *Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), Fondo Nacional del Arroz*. Santa Fe de Bogotá. Abril, 2000.
- Fedearroz, 2001. Arroz en Colombia: 1980-2001. *Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ)*. Santa Fe de Bogotá.
- Fernández, C., Koop, G. y Steel, M. (2003). Alternative Measures for Multiple-Output Production. Recuperado de: <http://www.le.ac.uk/economics/gmk6/fks3new.pdf>
- Henderson, D. J. (2003). The Measuring of Technical Efficiency using Data Panel. *Departamento de Economía. State University of New York at Binghamton*. May, 2003.
- Jaramillo, S., Pulver, E y Duque, M.C. (2003). Efecto del Manejo de la Fertilización Nitrogenada en Arroz de Riego, sobre la Expresión del Potencial de Rendimiento de Líneas Elite y Cultivares Comerciales. *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Fondo latinoamericano de Arroz de Riego (FLAR)*. 2003.
- Jondrow, J., Lovell, C.A.N., Materov, I. S. y Schmidt, P. (1982). On The Estimation of Technical Inefficiency in the Stochastic Frontier Production Function Model. *Journal of Econometrics*. No. 19. pp. 233-238. 1982.
- Kebede, T. A. (2001). Farm Household Technical Efficiency: A Stochastic Frontier Analysis. A Study of Rice Producers in Mardi Watershed in the Western Development Region of Nepal. Tesis de Maestría. *Department of Economics and Social Science. Agricultural University of Norway*. Junio, 2001.
- Kirkley, J. y Squires, D. (1999). Managing Fishing Capacity: Selected Papers on Underlying Concepts and Issues. *FAO FISHERIES TECHNICAL PAPER 386*. 1999.
- Kompas, T. (2002). Catch, Efficiency and Management: A Stochastic Production Frontier Analysis of the Australian Northern Prawn Fishery. Recuperado de: <http://apseg.anu.edu.au/pdf/ecdev/ecdv02-10.pdf>.
- Krasachat, W. (2003). Technical Efficiencies of Rice Farms in Thailand: A Non-Parametric Approach. Trabajo presentado en *Hawaii International Conference on Business, Honolulu*. 18-21 de Junio, 2003.

- Lauwers y Van Huylenbroeck, (2003). Materials Balance Based Modeling of Environmental Efficiency. Trabajo seleccionado para presentarlo en la *25ava. Conferencia Internacional de Economistas Agrícola*. Agosto 16-22, 2003, Durban, South África.
- Lema, D. y Delgado, G., (1998). Productividad y Fuentes de Eficiencia Técnica en Apicultura: Estimación de Fronteras Estocásticas de Producción con Datos de Panel. *Instituto de Economía y Sociología – INTA*. Argentina, 1998.
- Li, S. y Cheng Y. (2004). Technical Efficiency versus Environmental Efficiency: An Application to the Industrial Sector in China. *BCR Papers on China*. Hong Kong Baptist University. June, 2004.
- Murillo Z., L.R. y Vega C., J (2000). The Use of Parametric and NonParametric Frontier Methods to Measure the Productivity Efficiency in the Industrial Sector. A Comparative Study. *Discussion Papers in Economics*. The University of York. No. 2000/17. March, 2000.
- Nahm, D. y Sutummakid, N. (2003). Efficiency of Agricultural Production in the Central Region of Thailand. *Department of Economics. Macquarie University*. Sydney, Australia. June, 2003.
- Ojo, S.O. (2003). Productivity and Technical Efficiency of Poultry Egg Production in Nigeria. *International Journal of Poultry Science* 2(6). pp. 459-464. 2003.
- Pascoe, S., Kirkley, J.E., Gréboval, D. y Morrison-Paul, C.J. (2003). Measuring and Assessing Capacity in Fisheries. 2. Issues and methods. *FAO Fisheries Technical Paper*. No. 433/2. Rome, FAO. 2003.
- Reinhard, S. (1999). Econometric Analysis of Economic and Environmental Efficiency of Dutch Dairy Farms. *Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University*. 1999.
- Reinhard S., Lovell, C.A. y Thijssen G. (1997). Environmental Efficiency with Multiple Environmentally Detrimental Variables Estimated with SFA and DEA. *Wageningen Economic Papers*. Issue 07. November, 1997.

- Reinhard S., Lovell, C.A. y Thijssen G. (1999). Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms. *American Journal of Agricultural Economics*. No 81. February, 1999. pp. 44-60.
- Reinhard S., Lovell, C.A. y Thijssen G. (2002). Analysis of Environmental Efficiency Variation. *American Journal Agricultural Economics*. No. 84. November 2002. pp. 1054-1065.
- Sriboonchitta, S. y Wiboonpongse, A. (1999). On Estimation of Stochastic Production-Frontier with Self Selective: Jasmine and Non-jasmine Rice in Thailand. Chiang Mai University. 1999.
- Srivastava, A. (2002). Methodology for Measuring Environmental Efficiency. Trabajo presentado en *SCRA 2002-FIM IX: Ninth International Conference of Forum for Interdisciplinary Mathematics on Statistics Combinatorics and Related Areas*. Departamento de Estadísticas y Departamento de Matemáticas: Universidad de Allahabad Allahabad, UP, India. December, 2002.

## 8. ANEXOS

### Anexo A. Derivación de la Ecuación de Eficiencia Ambiental

Se parte de la forma funcional general tipo Translogarítmica:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \beta_o + \sum_j \beta_j \ln X_{ij} + \beta_b \ln b_{it} + \frac{1}{2} \sum_j \sum_K \beta_{jk} \ln X_{ij} \ln X_{ik} + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} \ln X_{ij} \ln b_{it} + \\ & \frac{1}{2} \beta_{ij} (\ln X_{ij})^2 + \frac{1}{2} \beta_{bb} (\ln b_{it})^2 + V_{it} - U_i \end{aligned} \quad (a)$$

con  $j \neq k$ .

Si la firma es ambientalmente eficiente, entonces el insumo no convencional  $b_{it}$  será reducido a  $b_{it}^F$  y  $U_i = 0$ . Por lo tanto, la forma funcional quedaría como sigue:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \beta_o + \sum_j \beta_j \ln X_{ij} + \beta_b \ln b_{it}^F + \frac{1}{2} \sum_j \sum_K \beta_{jk} \ln X_{ij} \ln X_{ik} + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} \ln X_{ij} \ln b_{it}^F + \\ & \frac{1}{2} \beta_{ij} (\ln X_{ij})^2 + \frac{1}{2} \beta_{bb} (\ln b_{it}^F)^2 + V_{it} \end{aligned} \quad (b)$$

Igualando (a) y (b), se obtiene:

$$\begin{aligned} \beta_b \ln b_{it} + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} \ln X_{ij} \ln b_{it} + \frac{1}{2} \beta_{bb} (\ln b_{it})^2 - U_i = & \beta_b \ln b_{it}^F + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} \ln X_{ij} \ln b_{it}^F + \\ & \frac{1}{2} \beta_{bb} (\ln b_{it}^F)^2 \end{aligned} \quad (c)$$

$$\beta_b (\ln b_{it}^F - \ln b_{it}) + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} \ln X_{ij} (\ln b_{it}^F - \ln b_{it}) + \frac{1}{2} \beta_{bb} [(\ln b_{it}^F)^2 - (\ln b_{it})^2] + U_i = 0 \quad (d)$$

Lo que puede reescribirse como:

$$\frac{1}{2} \beta_{bb} [\ln b_{it}^F - \ln b_{it}]^2 + \left[ \beta_b + \frac{1}{2} \sum_j \beta_{jb} \ln X_{ij} + \beta_{bb} \ln b_{it} \right] [\ln b_{it}^F - \ln b_{it}] + U_i = 0 \quad (e)$$

Sabiendo que la definición de eficiencia ambiental viene dada por la ecuación (4) (dada en el Marco Empírico) y haciendo una transformación a la misma, se obtiene:

$$\text{Ln}EA_R = \text{Ln}0b^F - \text{Ln}0b_R = \text{Ln}b_{it}^F - \text{Ln}b_{it} \quad (f)$$

Reemplazando la ecuación (e) en la ecuación (d):

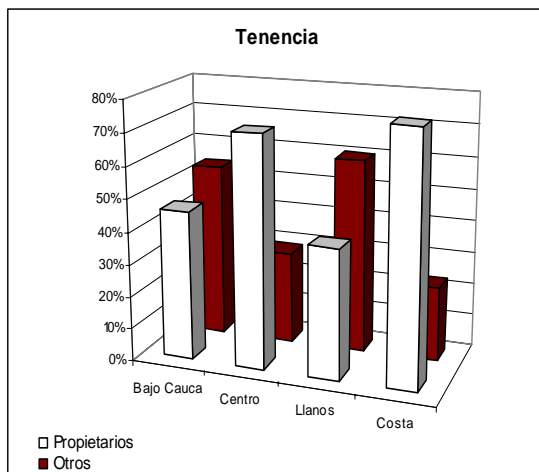
$$\frac{1}{2}\beta_{bb}\text{Ln}EA_{it}^2 + \text{Ln}EA_{it}\left(\beta_b + \frac{1}{2}\sum_j\beta_{jb}\text{Ln}X_{itj} + \beta_{bb}\text{Ln}b_{it}\right) + U_i = 0 \quad (g)$$

Se resuelve esta ecuación de segundo grado, obteniéndose:

$$\text{Ln}EA_{it} = \frac{-\left(\beta_b + \sum_j\beta_{jb}\text{Ln}X_{itj} + \beta_{bb}\text{Ln}b_{it}\right) \pm \sqrt{\left(\beta_b + \frac{1}{2}\sum_j\beta_{jb}\text{Ln}X_{itj} + \beta_{bb}\text{Ln}b_{it}\right)^2 - (2\beta_{bb})U_i}}{\beta_{bb}}$$

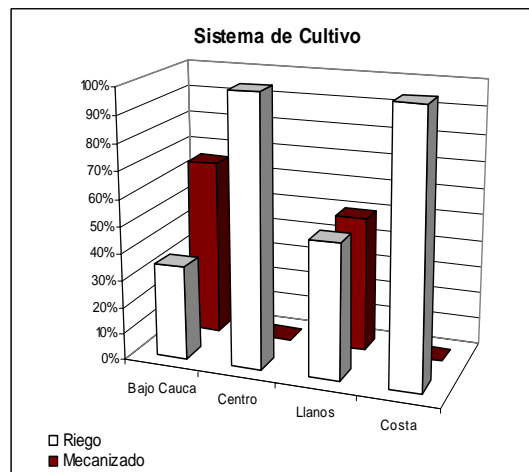
## Anexo B. Gráficos de las Variables de Estratificación para cada Zona

### Tenencia



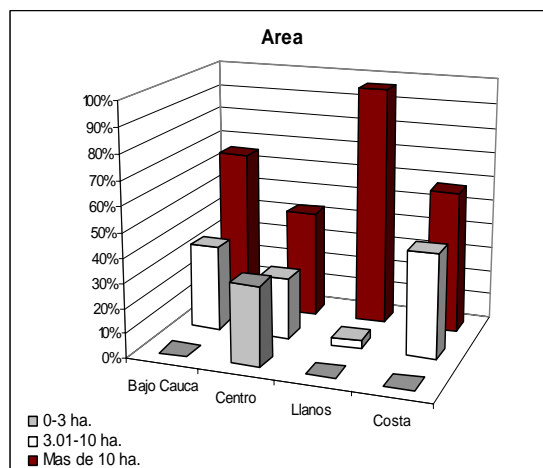
Cálculos: Propios a partir de Fedearroz (2001)

### Sistema de Cultivo



Cálculos: Propios a partir de Fedearroz (2001)

### Área



Cálculos: Propios a partir de Fedearroz (2001)

## Anexo C. Estadísticas Descriptivas

**Tabla a. Estadísticas Descriptivas de las Variables Usadas en el Modelo de Frontera Estocástica para el Modelo Conjunto**

| Variable       | Media    | Desviación Estándar | Mínimo | Máximo  | Unidades  |
|----------------|----------|---------------------|--------|---------|-----------|
| <i>Rice</i>    | 5764.565 | 1431.786            | 1550   | 9531.25 | Kg./ha.   |
| <i>Agua</i>    | 1915.841 | 3400.298            | 0      | 16848   | Lts./ha.  |
| <i>mohoras</i> | 76.072   | 51.447              |        | 246.6   | Horas/ha. |
| <i>stquant</i> | 237.551  | 39.326              | 140    | 343.8   | Kg./ha.   |
| <i>Fert</i>    | 6001.993 | 1446.569            | 1763.5 | 9844.75 | Kg./ha.   |
| <i>Plagui</i>  | 5.349    | 2.792               | .23    | 12.79   | Lts./ha.  |
| <i>hormaqt</i> | 9.609    | 3.983               | 3.14   | 30.5    | Horas/ha. |
| <i>nitrex</i>  | 13.504   | 23.629              | 0      | 123.71  | Kg./ha.   |
| <i>nitroge</i> | 129.881  | 61.827              | 0      | 330     | Kg./ha.   |
| <i>sistema</i> | .709     | .455                | 0      | 1       | 0/1       |

Cálculos: Propios a partir de Fedearroz (2001)

**Tabla b. Estadísticas Descriptivas de las Variables Utilizadas para Analizar el Comportamiento de las Eficiencias**

| Variable       | Media | Desv. Estándar | Mínimo | Máximo | Unidades |
|----------------|-------|----------------|--------|--------|----------|
| <i>asist1</i>  | .714  | .453           | 0      | 1      | 0/1      |
| <i>Rango</i>   | 1.582 | .639           | 0      | 2      | 0/1/2    |
| <i>credila</i> | .886  | .318           | 0      | 1      | 0/1      |

Cálculos: Propios a partir de Fedearroz (2001)

**Anexo D. Modelos Utilizados en la Construcción de la Variable Proxy del Exceso de Nitrógeno y los Óptimos Técnicos Obtenidos.**

Para el cálculo de los óptimos técnicos se procedió a estimar una regresión por cada tipo de zona, pues éstas difieren en tipo de clima, suelo, etc., reflejando así diferencias en los estimados de uso de nitrógeno. Se realizaron estimaciones por sistema y se hallaron los óptimos técnicos de nitrógeno, realizando, luego, pruebas de significancia obteniéndose que las diferencias entre zonas son estadísticamente significativas, mientras que entre los sistemas de cultivo no lo fueron.

Zona 1:

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Log likelihood = -463.87564 | Wald chi2(5) = 1665.66 |
|                             | Prob > chi2 = 0.0000   |

$$\hat{Rice}_{it} = 65,84Nitr\hat{o}ge - 0,141Ni\hat{t}roge^2 - 0,11\hat{A}gua + 0,00002A\hat{g}ua^2 + 0,0Agu\hat{a}Nitroge$$

(0,0000)                      (0,0000)                      (0,608)                      (0,193)                      (0,922)

*Óptimo Técnico en la media:* 233,29 Kg. N/ha.

Zona 2:

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Log likelihood = -480.52351 | Wald chi2(2) = 2247.30 |
|                             | Prob > chi2 = 0.0000   |

$$\hat{Rice}_{it} = 108,152Nitr\hat{o}ge - 0,479Ni\hat{t}roge^2$$

(0,0000)                      (0,0000)

*Óptimo Técnico en la media:* 112,96 Kg. N/ha.

Zona 3:

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Log likelihood = -440.95995 | Wald chi2(5) = 1191.39 |
|                             | Prob > chi2 = 0.0000   |

$$\hat{Rice}_{it} = 90,228Nitr\hat{o}ge - 0,333Ni\hat{t}roge^2 - 0,119\hat{A}gua + 0,0000A\hat{g}ua^2 + 0,001Agu\hat{a}Nitroge$$

(0,0000)                      (0,0000)                      (0,443)                      (0,874)                      (0,266)

*Óptimo Técnico en la media:* 138 Kg. N/ha.





## Anexo E. Frontera de Producción Estocástica para el Modelo Conjunto

Time-invariant inefficiency model  
 Group variable (i): producto  
 Time variable (t): year  
 Log likelihood = 62.938398

Number of obs = 220  
 Number of groups = 110  
 Obs per group: min = 2  
 avg = 2  
 max = 2  
 Wald chi2(36) = 237.62  
 Prob > chi2 = 0.0000

| lnrice     | Coef.     | Std. Err. | z     | P> z  | [95% Conf. Interval] |
|------------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|
| lnagua     | .0297186  | .1265072  | 0.23  | 0.814 | -.218231 .2776682    |
| lnstquan   | -.241294  | 1.091883  | -0.22 | 0.825 | -2.381346 1.898758   |
| lnmohora   | -.7855899 | .6619319  | -1.19 | 0.235 | -2.082953 .5117729   |
| lnfert     | .0876277  | .5748826  | 0.15  | 0.879 | -1.039122 1.214377   |
| lnplagui   | -.9043029 | .8501638  | -1.06 | 0.287 | -2.570593 .7619875   |
| lnhorma    | -1.183297 | 1.295357  | -0.91 | 0.361 | -3.722151 1.355556   |
| lnnitrex   | -.8456135 | .2784935  | -3.04 | 0.002 | -1.391451 -.2997763  |
| lnagst1    | -.0193302 | .0427823  | -0.45 | 0.651 | -.1031819 .0645216   |
| lnagm01    | .0115107  | .0143769  | 0.80  | 0.423 | -.0166675 .0396888   |
| lnagfer1   | .004211   | .0116254  | 0.36  | 0.717 | -.0185743 .0269963   |
| lnagnit1   | .0023585  | .003997   | 0.59  | 0.555 | -.0054755 .0101925   |
| lnagplal   | .0174821  | .0130393  | 1.34  | 0.180 | -.0080745 .0430388   |
| lnagmq1    | -.0707729 | .0233142  | -3.04 | 0.002 | -.1164679 -.0250778  |
| lnmostq1   | .4833274  | .246186   | 1.96  | 0.050 | .0008117 .9658431    |
| lnmofel    | -.0830006 | .0681966  | -1.22 | 0.224 | -.2166634 .0506622   |
| lnmonit1   | -.0742399 | .0271503  | -2.73 | 0.006 | -.1274535 -.0210263  |
| lnmopl1    | -.0225139 | .0793743  | -0.28 | 0.777 | -.1780847 .1330569   |
| lnmomaq1   | .2363798  | .1772745  | 1.33  | 0.182 | -.1110718 .5838314   |
| lnstfer1   | -.0785006 | .2067906  | -0.38 | 0.704 | -.4838027 .3268015   |
| lnstnit1   | .2921502  | .1041612  | 2.80  | 0.005 | .0879979 .4963024    |
| lnstplal   | .3292354  | .2991686  | 1.10  | 0.271 | -.2571243 .9155951   |
| lnstmaq1   | .1118859  | .4469684  | 0.25  | 0.802 | -.7641561 .9879279   |
| lnfeplal   | .0385108  | .0573091  | 0.67  | 0.502 | -.0738129 .1508346   |
| lnfern1    | .0189804  | .0191967  | 0.99  | 0.323 | -.0186444 .0566052   |
| lnfermq1   | .1447228  | .1511893  | 0.96  | 0.338 | -.1516029 .4410484   |
| lnplanit   | .0307745  | .0258771  | 1.19  | 0.234 | -.0199436 .0814926   |
| lnplamq1   | -.0369509 | .1249358  | -0.30 | 0.767 | -.2818206 .2079188   |
| lnmqnit1   | .0783494  | .0477226  | 1.64  | 0.101 | -.0151853 .171884    |
| lnag21     | .0116573  | .006869   | 1.70  | 0.090 | -.0018057 .0251202   |
| lnstq21    | -.2217711 | .204996   | -1.08 | 0.279 | -.6235558 .1800135   |
| lnmoh21    | -.1453093 | .0750754  | -1.94 | 0.053 | -.2924544 .0018357   |
| lnfert21   | .0498004  | .0126199  | 3.95  | 0.000 | .0250658 .074535     |
| lnplag21   | -.0170481 | .0592112  | -0.29 | 0.773 | -.1331 .0990037      |
| lnhmaq21   | .0913644  | .1415872  | 0.65  | 0.519 | -.1861414 .3688703   |
| lnnit21    | .003618   | .0143607  | 0.25  | 0.801 | -.0245285 .0317646   |
| sistema    | .3358982  | .0503809  | 6.67  | 0.000 | .2371536 .4346429    |
| _cons      | 13.0391   | 4.08951   | 3.19  | 0.001 | 5.023806 21.05439    |
| /mu        | -141.7394 | 1762.701  | -0.08 | 0.936 | -3596.571 3313.092   |
| /lnsigma2  | 2.985289  | 12.39112  | 0.24  | 0.810 | -21.30086 27.27144   |
| /ilgtgamma | 6.858738  | 12.40393  | 0.55  | 0.580 | -17.45251 31.16998   |
| sigma2     | 19.79222  | 245.2478  |       |       | 5.61e-10 6.98e+11    |
| gamma      | .9989509  | .0129998  |       |       | 2.63e-08 1           |
| sigma_u2   | 19.77145  | 245.2478  |       |       | -460.9053 500.4482   |
| sigma_v2   | .0207647  | .0028142  |       |       | .015249 .0262805     |

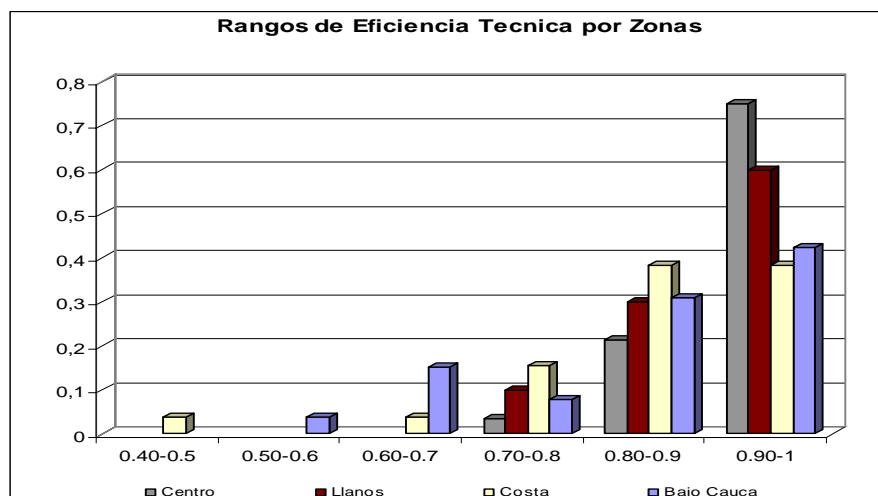
## Anexo F. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas

Tabla c. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para el Modelo Conjunto

| Zonas             | Eficiencia Técnica        |                           |                           |                            |                           |                             | Total                       |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                   | Rangos                    |                           |                           |                            |                           |                             |                             |
|                   | 0.40-0.5                  | 0.50-0.6                  | 0.60-0.7                  | 0.70-0.8                   | 0.80-0.9                  | 0.90-1                      |                             |
| <b>Centro</b>     |                           |                           |                           | 1<br>(3,6%)                | 6<br>(21,4%)              | 21<br>(75,0%)               | 28<br>(100%)                |
| <b>Llanos</b>     |                           |                           |                           | 3<br>(10,0%)               | 9<br>(30,0%)              | 18<br>(60,0%)               | 30<br>(100%)                |
| <b>Costa</b>      | 1<br>(3,9%)               |                           | 1<br>(3,9%)               | 4<br>(15,4%)               | 10<br>(38,4%)             | 10<br>(38,4%)               | 26<br>(100%)                |
| <b>Bajo Cauca</b> |                           | 1<br>(3,9%)               | 4<br>(15,3%)              | 3<br>(7,7%)                | 8<br>(30,8%)              | 11<br>(42,3%)               | 26<br>(100%)                |
| <b>Total</b>      | <b>1</b><br><b>(0,9%)</b> | <b>1</b><br><b>(0,9%)</b> | <b>5</b><br><b>(4,6%)</b> | <b>10</b><br><b>(9,1%)</b> | <b>33</b><br><b>(30%)</b> | <b>60</b><br><b>(54,6%)</b> | <b>110</b><br><b>(100%)</b> |

Cálculos: Propios

Gráfico a. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para el Modelo Conjunto



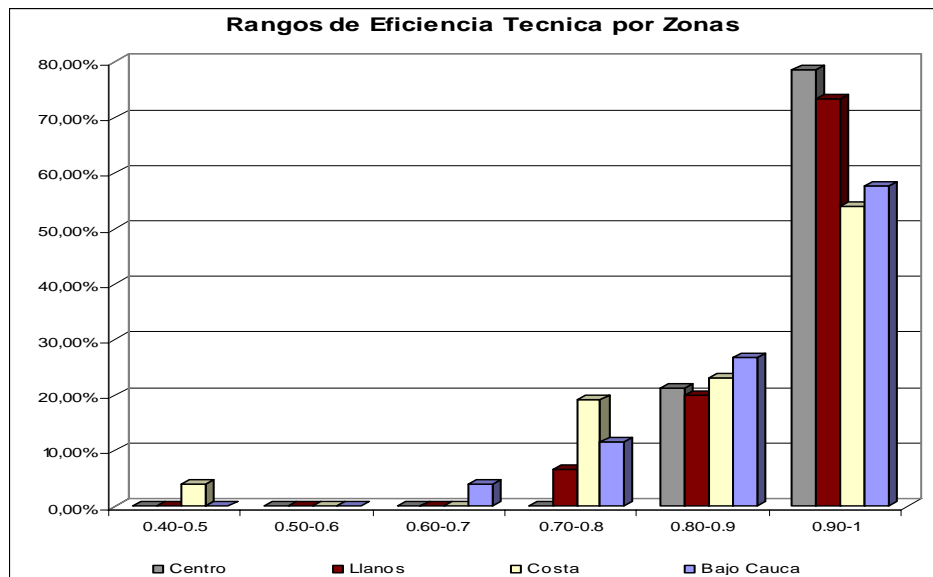
Cálculos: Propios

**Tabla d. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para los Modelos por Sistema**

| Zonas             | Eficiencia Técnica        |          |                           |                            |                             |                             | Total                       |
|-------------------|---------------------------|----------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                   | Rangos                    |          |                           |                            |                             |                             |                             |
|                   | 0.40-0.5                  | 0.50-0.6 | 0.60-0.7                  | 0.70-0.8                   | 0.80-0.9                    | 0.90-1                      |                             |
| <b>Centro</b>     |                           |          |                           |                            | 6<br>(21,4%)                | 22<br>(78,6%)               | 28<br>(100%)                |
| <b>Llanos</b>     |                           |          |                           | 2<br>(6,7%)                | 6<br>(20,0%)                | 22<br>(73,3%)               | 30<br>(100%)                |
| <b>Costa</b>      | 1<br>(3,9%)               |          |                           | 5<br>(19,2%)               | 6<br>(23,1%)                | 14<br>(53,9%)               | 26<br>(100%)                |
| <b>Bajo Cauca</b> |                           |          | 1<br>(3,9%)               | 3<br>(11,5%)               | 7<br>(26,9%)                | 15<br>(57,7%)               | 26<br>(100%)                |
| <b>Total</b>      | <b>1</b><br><b>(0,9%)</b> | <b>0</b> | <b>1</b><br><b>(0,9%)</b> | <b>10</b><br><b>(9,1%)</b> | <b>25</b><br><b>(22,7%)</b> | <b>73</b><br><b>(66,4%)</b> | <b>110</b><br><b>(100%)</b> |

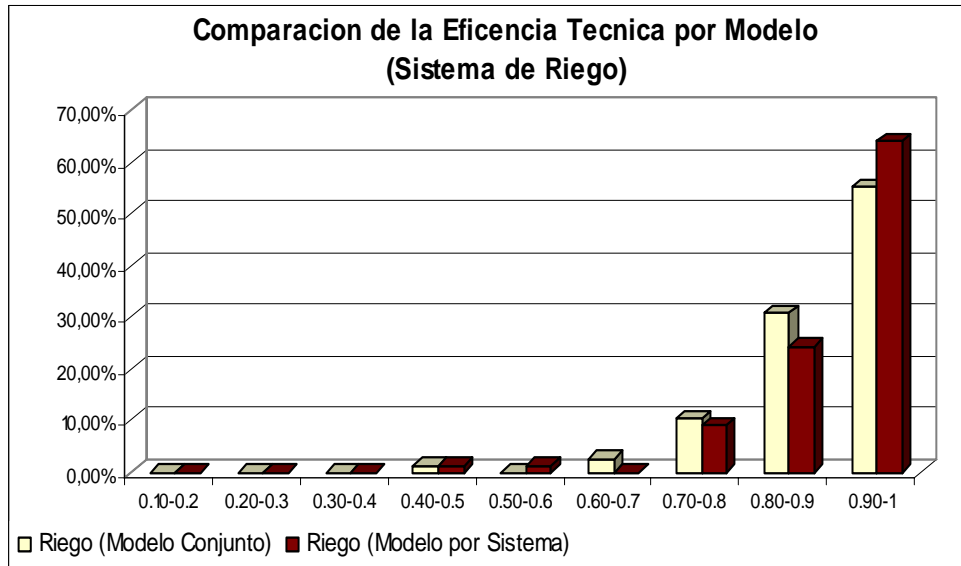
Cálculos: Propios

**Gráfico b. Rangos de Eficiencia Técnica por Zonas para los Modelos por Sistemas**



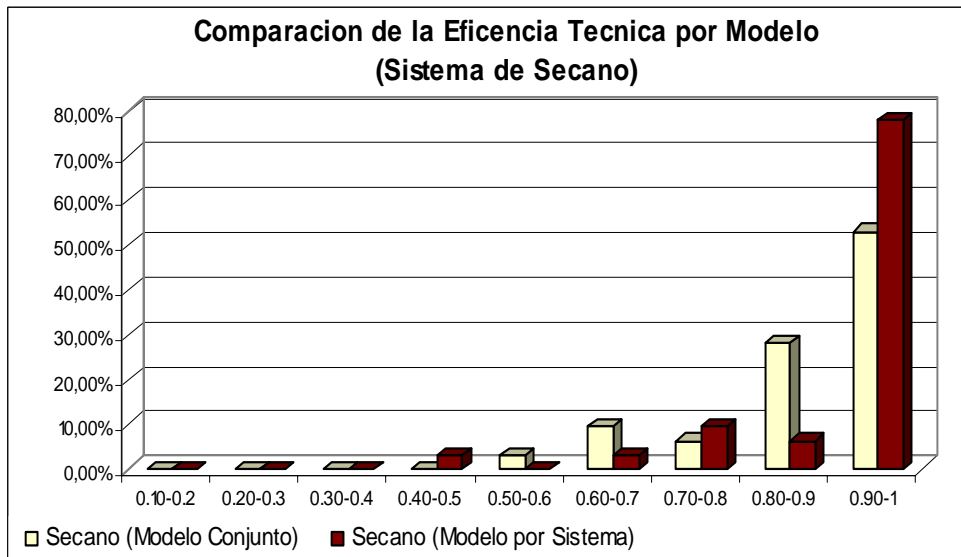
Cálculos: Propios

**Gráfico c. Comparación de los Rangos de Eficiencia Técnica por Modelo para el Sistema de Riego**



Cálculos: Propios

**Gráfico d. Comparación de los Rangos de Eficiencia Técnica por Modelo para el Sistema de Secano**



Cálculos: Propios

## Anexo G. Frontera de Producción Estocástica para los Modelos por Sistema

### Modelo 2.a: Sistema de Secano

```

Time-invariant inefficiency model
Group variable (i): producto
Time variable (t): year
Number of obs      =      64
Number of groups   =      32
Obs per group: min =       2
                  avg  =       2
                  max  =       2
Wald chi2(27)     =    206.84
Prob > chi2       =     0.0000
Log likelihood    =   36.799438
    
```

| lnrice     | Coef.     | Std. Err. | z      | P> z  | [95% Conf. Interval] |
|------------|-----------|-----------|--------|-------|----------------------|
| lnstquan   | -32.41566 | 12.22835  | -2.65  | 0.008 | -56.38278 -8.44853   |
| lnmohora   | -2.509764 | 1.913257  | -1.31  | 0.190 | -6.259679 1.24015    |
| lnfert     | -2.59359  | .9929155  | -2.61  | 0.009 | -4.539669 -.6475119  |
| lnplagui   | -5.292452 | 1.591646  | -3.33  | 0.001 | -8.412021 -2.172883  |
| lnhorma    | -19.32597 | 5.603497  | -3.45  | 0.001 | -30.30862 -8.343314  |
| lnnitrex   | -.9340112 | .9487912  | -0.98  | 0.325 | -2.793608 .9255854   |
| lnmostq1   | .3327128  | .5809969  | 0.57   | 0.567 | -.8060202 1.471446   |
| lnmofel    | -.2264929 | .1052853  | -2.15  | 0.031 | -.4328484 -.0201374  |
| lnmonit1   | -.0550762 | .0892809  | -0.62  | 0.537 | -.2300636 .1199112   |
| lnmopl1    | .3406704  | .2116437  | 1.61   | 0.107 | -.0741436 .7554845   |
| lnmomaq1   | .2399683  | .4769776  | 0.50   | 0.615 | -.6948905 1.174827   |
| lnstfer1   | .7688317  | .3429609  | 2.24   | 0.025 | -.0966407 1.441023   |
| lnstnit1   | .2672994  | .3422685  | 0.78   | 0.435 | -.4035346 .9381334   |
| lnstpla1   | 1.89295   | .5346906  | 3.54   | 0.000 | .8449757 2.940924    |
| lnstmaq1   | 5.417169  | 1.776434  | 3.05   | 0.002 | 1.935423 8.898915    |
| lnfepla1   | .0968109  | .0956169  | 1.01   | 0.311 | -.0905948 .2842166   |
| lnfernl    | .0778925  | .0306539  | 2.54   | 0.011 | .0178119 .137973     |
| lnfermq1   | .6702619  | .2568039  | 2.61   | 0.009 | .1669355 1.173588    |
| lnplanit   | .0288826  | .038976   | 0.74   | 0.459 | -.0475089 .1052742   |
| lnplamq1   | -.4262004 | .3483291  | -1.22  | 0.221 | -1.108913 .2565121   |
| lnmqnit1   | .1708505  | .1509056  | 1.13   | 0.258 | -.1249191 .46662     |
| lnstq21    | 4.26851   | 2.088253  | 2.04   | 0.041 | .1756094 8.36141     |
| lnmoh21    | .4215692  | .2130399  | 1.98   | 0.048 | .0040187 .8391197    |
| lnfert21   | .0528267  | .0149087  | 3.54   | 0.000 | .0236063 .0820472    |
| lnplag21   | -.2180404 | .0975107  | -2.24  | 0.025 | -.4091579 -.026923   |
| lnhmaq21   | 1.391719  | .5689693  | 2.45   | 0.014 | .2765595 2.506878    |
| lnnit21    | -.0476524 | .0370448  | -1.29  | 0.198 | -.1202588 .024954    |
| _cons      | 130.5747  | 37.90533  | 3.44   | 0.001 | 56.28162 204.8678    |
| /mu        | -173.5433 | .         | .      | .     | .                    |
| /lnsigma2  | 3.067297  | .0094297  | 325.28 | 0.000 | 3.048815 3.085778    |
| /ilgtgamma | 7.673859  | .2298094  | 33.39  | 0.000 | 7.223441 8.124277    |
| sigma2     | 21.48374  | .2025853  |        |       | 21.09033 21.8845     |
| gamma      | .9995354  | .0001067  |        |       | .9992712 .9997038    |
| sigma_u2   | 21.47376  | .2025926  |        |       | 21.07669 21.87084    |
| sigma_v2   | .0099814  | .0022911  |        |       | .005491 .0144719     |

## Modelo 2.b: Sistema de Riego

Time-invariant inefficiency model  
 Group variable (i): producto  
 Time variable (t): year

Number of obs = 156  
 Number of groups = 78  
 Obs per group: min = 2  
 avg = 2  
 max = 2  
 Wald chi2(35) = 137.28  
 Prob > chi2 = 0.0000

Log likelihood = 63.622218

| lnrice     | Coef.     | Std. Err. | z      | P> z  | [95% Conf. Interval] |
|------------|-----------|-----------|--------|-------|----------------------|
| lnagua     | .1071815  | .1240231  | 0.86   | 0.387 | -.1358994 .3502624   |
| lnstquan   | 3.432661  | 1.919653  | 1.79   | 0.074 | -.3297892 7.195111   |
| lnmohora   | -1.932675 | .81663    | -2.37  | 0.018 | -3.53324 -.3321097   |
| lnfert     | .5202935  | 1.095336  | 0.48   | 0.635 | -1.626526 2.667113   |
| lnplagui   | 1.298656  | 1.091874  | 1.19   | 0.234 | -.8413781 3.43869    |
| lnhorma    | -1.344272 | 1.430126  | -0.94  | 0.347 | -4.147267 1.458724   |
| lnnitrex   | -.5767877 | .3052376  | -1.89  | 0.059 | -1.175042 .0214671   |
| lnagst1    | -.0645677 | .0450953  | -1.43  | 0.152 | -.1529528 .0238174   |
| lnagm01    | .0026746  | .0158669  | 0.17   | 0.866 | -.028424 .0337731    |
| lnagfer1   | .0174907  | .0156442  | 1.12   | 0.264 | -.0131714 .0481527   |
| lnagnit1   | -.0005179 | .0040899  | -0.13  | 0.899 | -.0085339 .007498    |
| lnagplal   | .0435757  | .0148728  | 2.93   | 0.003 | .0144255 .0727258    |
| lnagmq1    | -.0649522 | .0229868  | -2.83  | 0.005 | -.1100054 -.019899   |
| lnmostq1   | .8011426  | .2950681  | 2.72   | 0.007 | .2228197 1.379466    |
| lnmofel    | .0521444  | .1022448  | 0.51   | 0.610 | -.1482517 .2525406   |
| lnmonit1   | -.1102135 | .0293261  | -3.76  | 0.000 | -.1676915 -.0527354  |
| lnmopl1    | -.0214412 | .1034502  | -0.21  | 0.836 | -.2241999 .1813176   |
| lnmomaq1   | .2075362  | .1906303  | 1.09   | 0.276 | -.1660923 .5811646   |
| lnstfer1   | -.3336141 | .3990998  | -0.84  | 0.403 | -1.115835 .4486072   |
| lnstnit1   | .2253289  | .1129187  | 2.00   | 0.046 | .0040123 .4466455    |
| lnstplal   | -.5416114 | .3707199  | -1.46  | 0.144 | -1.268209 .1849862   |
| lnstmaq1   | .1461777  | .4878236  | 0.30   | 0.764 | -.809939 1.102294    |
| lnfeplal   | .0467138  | .1441248  | 0.32   | 0.746 | -.2357657 .3291933   |
| lnfernl    | .0001782  | .0337741  | 0.01   | 0.996 | -.0660177 .0663742   |
| lnfermq1   | .1390914  | .1983389  | 0.70   | 0.483 | -.2496457 .5278286   |
| lnplanit   | .0148504  | .0312524  | 0.48   | 0.635 | -.0464032 .0761041   |
| lnplamq1   | -.1378193 | .1591557  | -0.87  | 0.387 | -.4497588 .1741201   |
| lnmqnit1   | .1024569  | .051574   | 1.99   | 0.047 | .0013738 .20354      |
| lnag21     | .0139095  | .0063399  | 2.19   | 0.028 | .0014834 .0263355    |
| lnstq21    | -.7607497 | .269134   | -2.83  | 0.005 | -1.288243 -.2332569  |
| lnmoh21    | -.1376593 | .082611   | -1.67  | 0.096 | -.299574 .0242553    |
| lnfert21   | .0264856  | .0390424  | 0.68   | 0.498 | -.0500361 .1030073   |
| lnplag21   | .1370652  | .0830928  | 1.65   | 0.099 | -.0257936 .2999241   |
| lnhmaq21   | .1964488  | .1419039  | 1.38   | 0.166 | -.0816779 .4745754   |
| lnnit21    | .0204588  | .0145882  | 1.40   | 0.161 | -.0081336 .0490511   |
| _cons      | 2.853011  | 7.609007  | 0.37   | 0.708 | -12.06037 17.76639   |
| /mu        | -169.9084 | .         | .      | .     | .                    |
| /lnsigma2  | 3.022257  | .0060299  | 501.21 | 0.000 | 3.010439 3.034076    |
| /ilgtgamma | 7.129251  | .1468319  | 48.55  | 0.000 | 6.841465 7.417036    |
| sigma2     | 20.5376   | .123839   |        |       | 20.29631 20.78176    |
| gamma      | .9991993  | .0001175  |        |       | .9989326 .9993994    |
| sigma_u2   | 20.52116  | .1238449  |        |       | 20.27843 20.76389    |
| sigma_v2   | .016444   | .0024113  |        |       | .011718 .02117       |

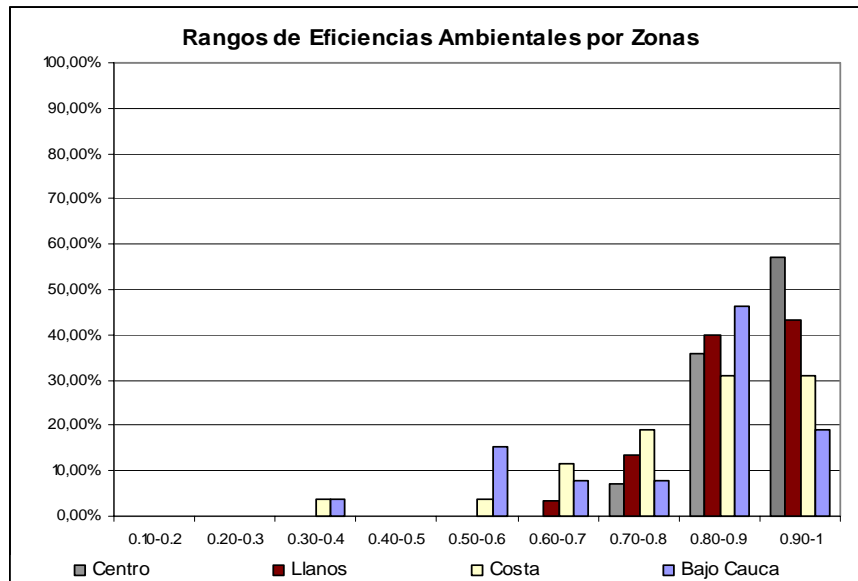
## Anexo H. Rangos de Eficiencia Ambiental

**Tabla e. Rangos de Eficiencia Ambiental por Zonas para el Modelo Conjunto**

| Zonas             | Eficiencia Ambiental |          |              |              |               |               |               | Total         |
|-------------------|----------------------|----------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                   | Rangos               |          |              |              |               |               |               |               |
|                   | 0.30-0.4             | 0.40-0.5 | 0.50-0.6     | 0.60-0.7     | 0.70-0.8      | 0.80-0.9      | 0.90-1        |               |
| <b>Centro</b>     |                      |          |              |              | 2<br>(7,1%)   | 10<br>(35,7%) | 16<br>(57,2%) | 28<br>(100%)  |
| <b>Llanos</b>     |                      |          |              | 1<br>(3,3%)  | 4<br>(13,3%)  | 12<br>(40,0%) | 13<br>(43,4%) | 30<br>(100%)  |
| <b>Costa</b>      | 1<br>(3,9%)          |          | 1<br>(3,9%)  | 3<br>(11,4%) | 5<br>(19,2%)  | 8<br>(30,8%)  | 8<br>(30,8%)  | 26<br>(100%)  |
| <b>Bajo Cauca</b> | 1<br>(3,9%)          |          | 4<br>(15,4%) | 2<br>(7,7%)  | 2<br>(7,7%)   | 12<br>(46,1%) | 5<br>(19,2%)  | 26<br>(100%)  |
| <b>Total</b>      | 2<br>(1,8%)          | 0        | 5<br>(4,5%)  | 6<br>(5,5%)  | 13<br>(11,8%) | 42<br>(38,2%) | 42<br>(38,2%) | 110<br>(100%) |

Cálculos: Propios

**Gráfico e. Rangos de Eficiencia Ambiental por zonas para el Modelo Conjunto**



Cálculos: Propios

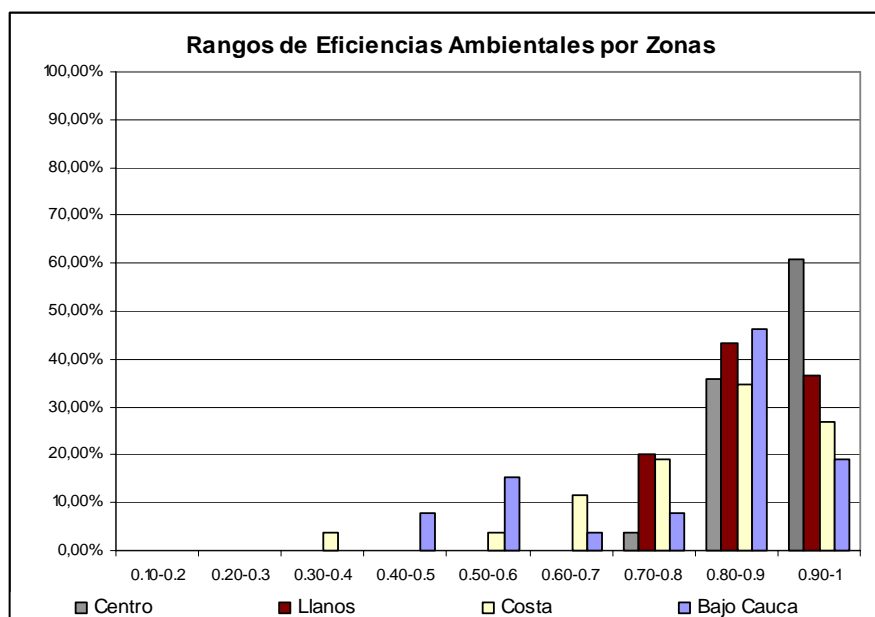


**Tabla f. Rangos de Eficiencia Ambiental por Zonas para los Modelos por Sistemas**

| Zonas             | Eficiencia Ambiental      |                           |                           |                           |                             |                             |                             |                             |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                   | Rangos                    |                           |                           |                           |                             |                             |                             |                             |
|                   | 0.30-0.4                  | 0.40-0.5                  | 0.50-0.6                  | 0.60-0.7                  | 0.70-0.8                    | 0.80-0.9                    | 0.90-1                      | Total                       |
| <b>Centro</b>     |                           |                           |                           |                           | 1<br>(3,6%)                 | 10<br>(35,7%)               | 17<br>(60,7%)               | 28<br>(100%)                |
| <b>Llanos</b>     |                           |                           |                           |                           | 6<br>(20,0%)                | 13<br>(43,3%)               | 11<br>(36,7%)               | 30<br>(100%)                |
| <b>Costa</b>      | 1<br>(3,9%)               |                           | 1<br>(3,9%)               | 3<br>(11,6%)              | 5<br>(19,2%)                | 9<br>(34,6%)                | 7<br>(26,9%)                | 26<br>(100%)                |
| <b>Bajo Cauca</b> |                           | 2<br>(7,7%)               | 4<br>(15,4%)              | 1<br>(3,9%)               | 2<br>(7,7%)                 | 12<br>(46,1%)               | 5<br>(19,2%)                | 26<br>(100%)                |
| <b>Total</b>      | <b>1</b><br><b>(0,9%)</b> | <b>2</b><br><b>(1,8%)</b> | <b>5</b><br><b>(4,6%)</b> | <b>4</b><br><b>(3,6%)</b> | <b>15</b><br><b>(13,7%)</b> | <b>44</b><br><b>(40,0%)</b> | <b>39</b><br><b>(35,4%)</b> | <b>110</b><br><b>(100%)</b> |

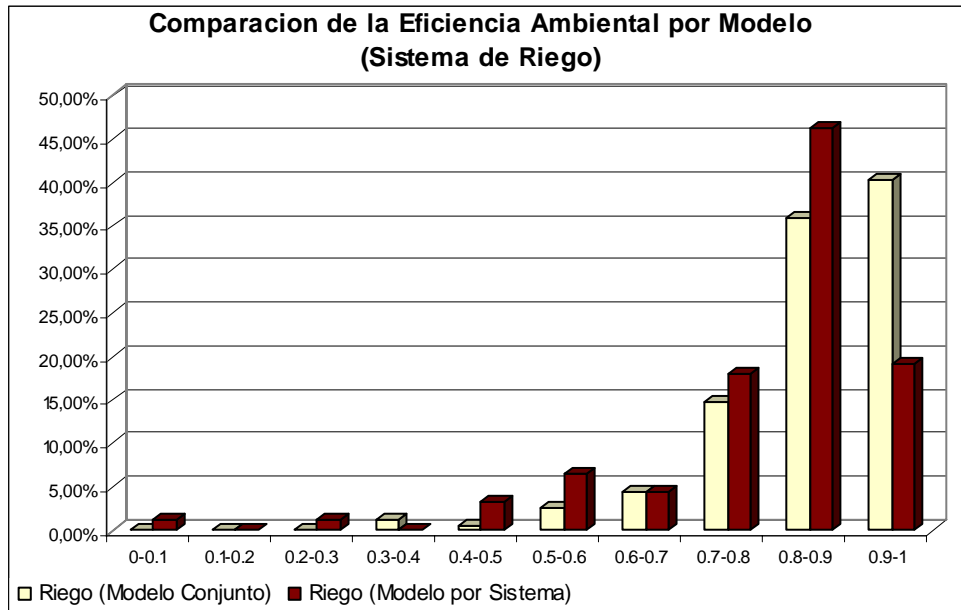
Cálculos: Propios

**Gráfico f. Rangos de Eficiencia Ambiental por Zonas para los Modelos por Sistema**



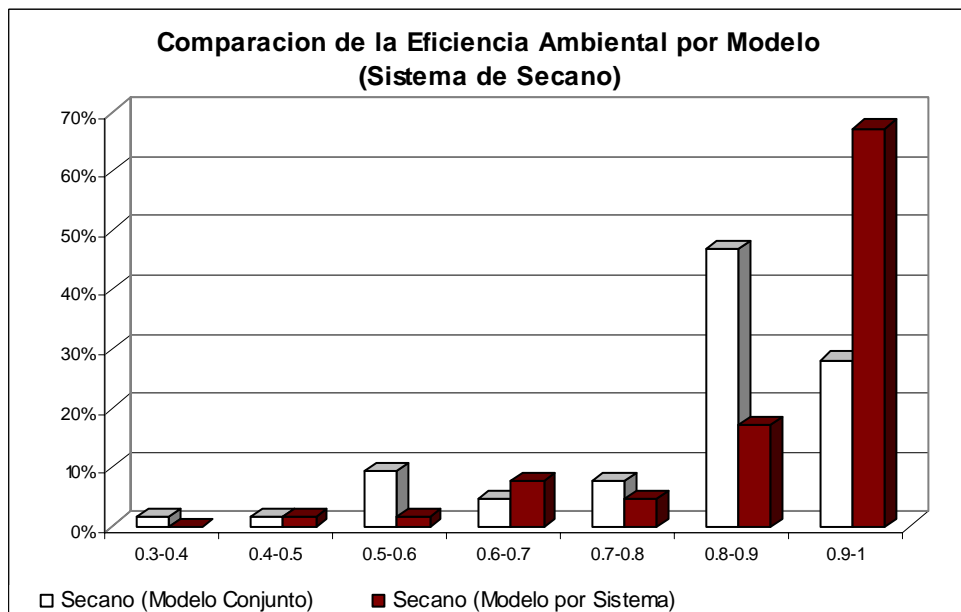
Cálculos: Propios

**Gráfico g. Comparación de los Rangos de Eficiencia Ambiental por Modelo para el Sistema de Riego**



Cálculos: Propios

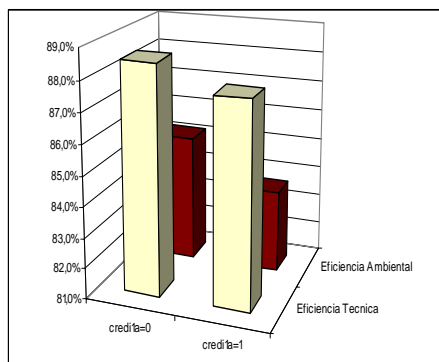
**Gráfico h. Comparación de los Rangos de Eficiencia Ambiental por Modelo para el Sistema de Secano**



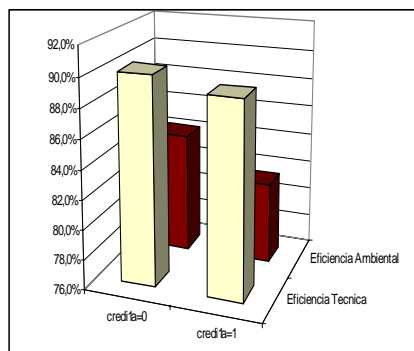
Cálculos: Propios

## Anexo I. Gráficos de las Variables que pueden Ayudar a Explicar el Comportamiento de las Eficiencias

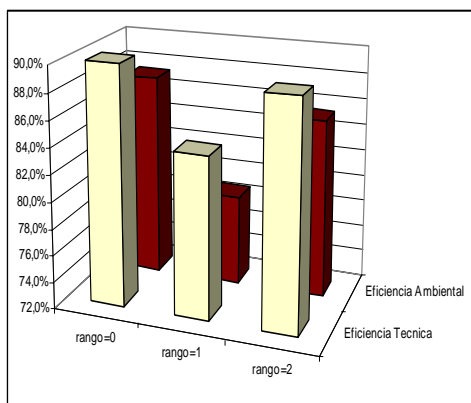
**Modelo Conjunto  
Variable Crédito**



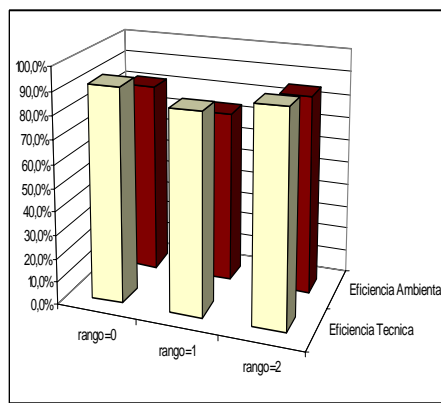
**Modelos por Sistema  
Variable Crédito**



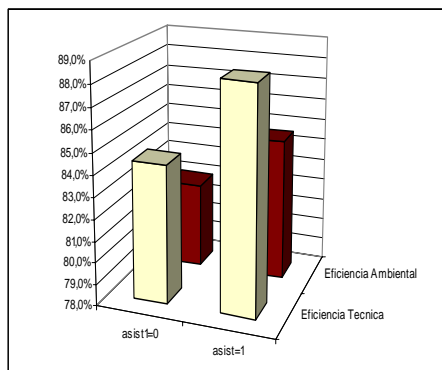
**Variable Área**



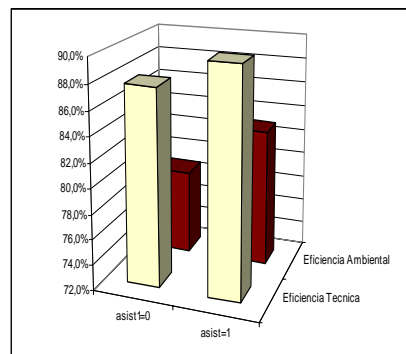
**Variable Área**



**Variable Asistencia Técnica**



**Variable Asistencia Técnica**



Cálculos: Propios a partir de los datos del censo de Fedearroz.