

Ensayos sobre POLÍTICA ECONÓMICA



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SECTOR DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD EN COLOMBIA: UNA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE FRONTERA ESTOCÁSTICA

YEINNI ANDREA PATIÑO MOYA
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ FLÓREZ
EMMA OSORIO MEDINA

ENSAYOS SOBRE POLÍTICA ECONÓMICA,
VOL. 28, NÚM. 62
EDICIÓN JUNIO 2010
PP. 70-123

Los derechos de reproducción de este documento son propiedad de la revista Ensayos Sobre Política Económica (*ESPE*). El documento puede ser reproducido libremente para uso académico, siempre y cuando no se obtenga lucro por este concepto y además, cada copia incluya la referencia bibliográfica de *ESPE*. El(los) autor(es) del documento puede(n) además poner en su propio website una versión electrónica del mismo, pero incluyendo la referencia bibliográfica de *ESPE*. La reproducción de esta revista para cualquier otro fin, o su colocación en cualquier otro website, requerirá autorización previa de su Editor de *ESPE*.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SETOR DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE NA COLÔMBIA: UMA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA

YEINNI ANDREA PATIÑO MOYA
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ FLÓREZ
EMMA OSORIO MEDINA*

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho na eficiência técnica das empresas que distribuem energia na Colômbia durante o período 2004-2007, usando a análise de fronteira estocástica (SFA). Emprega-se uma função de distância translog orientada aos insumos, isto permite considerar os produtos como dados os insumos como variáveis de controle. Os resultados empíricos arremessam que no setor de distribuição de energia não se gerou mudança tecnológica, nem melhoramentos na eficiência técnica no período de estudo. Além do mais, comprovou-se que as variáveis ambientais são determinantes da tecnologia de produção, pelo qual, considera-se que o desempenho administrativo das empresas está influenciado pelo entorno no qual operam. Os resultados indicam que 4 das empresas analisadas alcançam uma eficiência técnica por cima de 90%. Em geral, o setor apresenta uma eficiência técnica média de 60.12% e um componente de ineficiência que representa 94.5% do termo de erro composto, indicando que os erros aleatórios se devem em grande medida à ineficiência das empresas.

Classificação JEL: D24, C13, C23, L51.

Palavras chaves: Eficiência, Fronteira estocástica, distribuição de energia.

* Os autores são, respectivamente, Professor do Departamento de Economia da Pontifícia Universidade Javeriana de Cali, professor do Departamento de Economia da Pontifícia Universidade Javeriana de Cali e professor do departamento de economia da Pontifícia Universidade Javeriana de Cali.

Correio eletrônico: yapatino@javerianacali.edu.co; gagomez@javerianacali.edu.co; eosorio@javerianacali.edu.co

Documento Recebido no dia 17 novembro, 2009; versão final aceita no dia 15 fevereiro, 2010.

PERFORMANCE EVALUATION OF ENERGY
DISTRIBUTION COMPANIES IN COLOMBIA:
AN APPLICATION OF STOCHASTIC
FRONTIER ANALYSIS

YEINNI ANDREA PATIÑO MOYA
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ FLÓREZ
EMMA OSORIO MEDINA*

This study evaluates the performance, in terms of technical efficiency, of companies that distribute energy in Colombia during the period 2004–2007 period, using Stochastic Frontier Analysis (SFA).

It uses a translog input distance function to represent the technology of electricity distribution, which permits considering the products as given and inputs as control variables. Empirical results do not show technological change or improvements in technical efficiency; moreover, we found that environmental variables are determinants of production technology. Therefore, management performance of the companies is influenced by the environment in which they operate. The results indicate that the technical efficiency of four of the companies analyzed reached above 90%. In general, the sector presents an average technical efficiency of 60.12% and an inefficiency component that represents 94.5% of the composite error term, indicating that random errors are due largely to inefficient companies.

JEL Classification: D24, C13, C23, L51.

Keywords: efficiency, stochastic frontier, energy distribution.

* The authors are, respectively: professor at the Department of Economics of the Pontificia Universidad Javeriana Cali, professor at the Department of Economics of the Pontificia Universidad Javeriana Cali, and professor at the Department of Economics of the Pontificia Universidad Javeriana Cali.

E-mails: yapatino@javerianacali.edu.co; gagomez@javerianacali.edu.co; eosorio@javerianacali.edu.co

Document received: November 17, 2009; final version accepted: February 15, 2010.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SECTOR DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD EN COLOMBIA: UNA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE FRONTERA ESTOCÁSTICA

YEINNI ANDREA PATIÑO MOYA
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ FLÓREZ
EMMA OSORIO MEDINA*

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el desempeño en la eficiencia técnica de las empresas que distribuyen energía en Colombia durante el período 2004-2007, usando el análisis de frontera estocástica (SFA). Se emplea una función de distancia translog orientada a los insumos, lo que permite considerar a los productos como dados y a los insumos como variables de control. Los resultados empíricos arrojan que en el sector de distribución de energía no se generaron ni cambios tecnológicos ni mejoramientos en la eficiencia técnica durante el período de estudio. Además, se comprobó que las variables ambientales son determinantes de la tecnología de producción y en consecuencia se considera que el entorno en el que operan las empresas influye en su desempeño administrativo. Los resultados indican que cuatro de las empresas analizadas alcanzan una eficiencia técnica superior al 90 %. En general, el sector tiene una eficiencia técnica promedio de 60,12% y un componente de ineficiencia que representa el 94,50% del término de error compuesto; estas cifras indican que los errores aleatorios se deben, en gran medida, a la ineficiencia de las empresas.

Clasificación JEL: D24, C13, C23, L51.

Palabras clave: eficiencia, frontera estocástica, distribución de energía.

* Los autores son, respectivamente: profesora del Departamento de Economía de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, profesor del Departamento de Economía de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali y profesora del departamento de economía de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

Correos electrónicos: yapati-no@javerianacali.edu.co; gagomez@javerianacali.edu.co; eosorio@javerianacali.edu.co

Documento recibido: 17 de noviembre de 2009; versión final aceptada: 15 de febrero de 2010.

I. INTRODUCCIÓN

En la última década del siglo pasado Colombia entró en un acelerado proceso de privatización; sus gestores promovieron, principalmente, la reducción del gasto público y el saneamiento del presupuesto gubernamental. Se afirmaba, además, que este cambio ayudaría a que la economía colombiana tuviera una mayor eficiencia en la prestación de los servicios. En este proceso se incluyó también al sector de infraestructura; en éste, como en otros sectores, el objetivo es mejorar la eficiencia económica en la prestación de los servicios públicos. Sin embargo, el éxito de las privatizaciones está en que exista una regulación, pues a través de ella se promueve la competencia o se replica su sistema de incentivos, lo que estimula a las empresas a ser eficientes (Chong y Lora, 2007). Al regulador, además, le interesa que estas empresas logren la eficiencia técnica y que aumenten el nivel de producto, para así incrementar la cobertura y beneficiar a los grupos más pobres de la población (Chong y Lora, 2007). Por tal motivo, la medición de la eficiencia relativa y de su evolución temporal tiene importantes connotaciones en términos regulatorios.

Con el ánimo de contribuir a la discusión sobre eficiencia en el sector de infraestructura y de aportar nuevas perspectivas de análisis, este trabajo evalúa el desempeño en el sector de distribución de electricidad en Colombia. El estudio se centra en este sector porque éste presenta características de monopolio natural (Coelli *et al.*, 2003); además, la remuneración en este sector constituye un componente significativo del costo unitario de prestación del servicio¹. Este trabajo de investigación analiza el

1 El sector eléctrico remunera, además, la generación, la transmisión y la comercialización de energía, siendo la distribución la que aporta la mayor proporción.

problema de la medición la eficiencia técnica² en la distribución de energía en Colombia y busca responder las siguientes preguntas: ¿cuál es el promedio de eficiencia técnica en el sector de distribución de energía eléctrica para el período 2004-2007? ¿ha existido un desplazamiento de la frontera de producción durante el período de estudio? ¿Las empresas ineficientes han mejorado sus niveles de eficiencia? ¿Existen factores ambientales que expliquen los niveles de ineficiencia técnica?

El estudio empírico de la eficiencia se hace a través del análisis de frontera estocástica (SFA, por sus siglas en inglés). Se especifica una función de distancia orientada a los insumos ya que las firmas que distribuyen energía tienen más control sobre los insumos que sobre el producto a ofertar. Se incluye la tendencia temporal para valorar el cambio tecnológico y así observar si hay desplazamientos en la frontera de producción. Además, se introducen variables ambientales en la tecnología de producción para capturar desviaciones de la eficiencia causadas por eventos que están fuera del control de las empresas. En este documento se proponen cinco modelos para las estimaciones empíricas; éstos difieren entre sí según se incluya o no una variable de tendencia temporal, según se incluyan variables ambientales como argumento de la tecnología de producción o como argumento del término de ineficiencia y si suponen o no que la ineficiencia es invariante en el tiempo. Estas funciones de distancia se estiman por máxima verosimilitud usando FRONTIER versión 4.1 y Stata versión 10. La serie involucra datos anuales de veinticuatro compañías durante cuatro años, período comprendido entre el 2004 y el 2007.

El documento sigue la siguiente estructura: además de esta primera sección introductoria, en la sección II se contextualiza el sector energético colombiano y se plantea el problema de investigación. Después, en la sección III, se presenta el modelo teórico y, en particular, se hace referencia a la tecnología de producción, a las funciones de distancia de insumos, a las medidas de eficiencia técnica orientadas a los insumos y a los productos, al análisis de frontera estocástica y a los métodos de Estimación de las funciones de distancia. En la sección IV se exponen los estudios previos y se

2 Una frontera de producción muestra la máxima cantidad de producto que se puede producir a partir de una cantidad determinada de insumos. Un regulador puede estar interesado en observar qué tan alejada está una empresa regulada de la frontera. Esto es posible a través de la eficiencia técnica pues ésta muestra la capacidad de una empresa para alcanzar la máxima producción a partir de un conjunto de insumos. La medida de eficiencia técnica varía entre 0 y 1, donde 1 indica que la empresa es completamente eficiente y que opera en la frontera de producción, y la diferencia entre 0 y 1 indica el grado de ineficiencia.

especifican el modelo y los datos. Los resultados empíricos son tratados en la sección V y, finalmente, en la última sección se exponen las conclusiones y recomendaciones.

II. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INDUSTRIA DE ENERGÍA

A. ANTECEDENTES

Colombia ha tenido dos grandes crisis del sector energético que se hicieron evidentes con los racionamientos de energía en los años 1981 y 1992. De acuerdo con Sandoval (2004), estas crisis fueron causadas principalmente por las múltiples ineficiencias en la planeación, la estructuración y la coordinación de las entidades del sector (fallas que llevaron al desarrollo de grandes proyectos de generación, con sobrecostos y atrasos considerables); el subsidio inadecuado de tarifas; y la politización de las empresas estatales. Por otra parte, la operación ineficiente de las empresas públicas provocó su crisis financiera, pues estas compañías no generaban los ingresos suficientes para invertir y cubrir el servicio de la deuda al mismo tiempo. Todo lo anterior hizo que el sector de energía eléctrica se convirtiera en una gran carga para el Estado.

Estas crisis, y sobre todo la generada en 1992, puso en evidencia la necesidad de una reestructuración del sector energético en Colombia y, por ende, de una reforma regulatoria. La reestructuración del sector consistía en expandir la generación de energía y la capacidad de transmisión de manera que el país contara con plantas hidroeléctricas y térmicas y así pudiera garantizar la confiabilidad del sistema operativo y evitara futuros cortes de energía. Al mismo tiempo, la reforma regulatoria buscaba incrementar la eficiencia administrativa, operativa y financiera del sector. Para lograr esto, la reforma promovía: i) la competencia en la generación, distribución y comercialización de electricidad, ii) la inversión privada y iii) el acceso no restringido a los sectores de transmisión y distribución.

En 1994, y siguiendo los lineamientos de la Constitución de 1991, se expidieron la Ley Eléctrica (Ley 143) y la Ley de Servicios Públicos Domiciliarios (Ley 142), las cuales incluyeron la nueva reforma regulatoria. Estas leyes orientaron el diseño y la consolidación de una estructura institucional adecuada, previsible y eficiente que contribuyó a lograr las metas de desarrollo económico y social sostenible.

En particular, la Ley 142 de 1994 señala que se debe: i) garantizar la eficiencia y la calidad en la prestación de los servicios mediante la regulación de los monopolios y la promoción de la competencia, ii) ampliar la cobertura de prestación de los servicios

públicos, iii) permitir la participación privada en la prestación del servicio, iv) separar e identificar claramente el papel del Estado, v) garantizar la prestación del servicio mediante las funciones de planeación, regulación y control, y vi) racionalizar el régimen tarifario y administrar los subsidios en forma eficaz (Congreso de la República de Colombia, 1994).

De otro lado, la Ley 143 de 1994 establece: i) crear el ambiente de mercado y competencia, ii) delimitar la intervención del Estado, iii) dividir al sector en cuatro actividades: generación, transmisión, distribución y comercialización, iv) regir la prestación del servicio de energía eléctrica por los principios de eficiencia, calidad, continuidad, adaptabilidad, neutralidad, solidaridad, redistribución de ingresos y equidad, y v) establecer incompatibilidades y crear incentivos para la especialización de las empresas en actividades complementarias como, por ejemplo, actividades de generación y distribución o distribución y comercialización (Congreso de la República de Colombia, 1994)³.

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) fue creada a través de las leyes 142 y 143 de 1994. Esta institución, eminentemente técnica, se creó para regular las actividades de los servicios públicos y para promover la prestación de estos servicios al mayor número de personas y al menor costo posible para los usuarios. Además, buscaba garantizar que las empresas eficientes pudieran recuperar sus costos de inversión y sus gastos de administración, operación y mantenimiento, y así permitir la remuneración del patrimonio de los accionistas tal como lo habría hecho una empresa eficiente en un sector de riesgo comparable⁴. Estas leyes también crearon el Centro Nacional de Despacho (CND), el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASÍC) y el Liquidador y Administrador de Cuentas del Sistema de Transmisión Nacional (LAC). Estas instituciones fueron establecidas para operar y administrar el sistema. En la actualidad, la operación y la administración del mercado es responsabilidad de XM Compañía de Expertos en Mercados S. A. E. S. P.

3 Con excepción de las empresas creadas antes de la ley, las cuales podían continuar con dos o más actividades (excluyendo la transmisión de energía) pero debían llevar registros contables de cada actividad.

4 Las principales funciones de la CREG son: establecer condiciones para asegurar la disponibilidad de una oferta energética eficiente; determinar la liberación gradual del mercado hacia la libre competencia; aprobar los cargos por el uso y acceso de las redes; definir las tarifas y fórmulas vinculadas para los usuarios regulados; y establecer el reglamento de operación del Sistema interconectado nacional.

(filial de ISA), quien tiene a su cargo las funciones de las tres primeras instituciones mencionadas anteriormente.

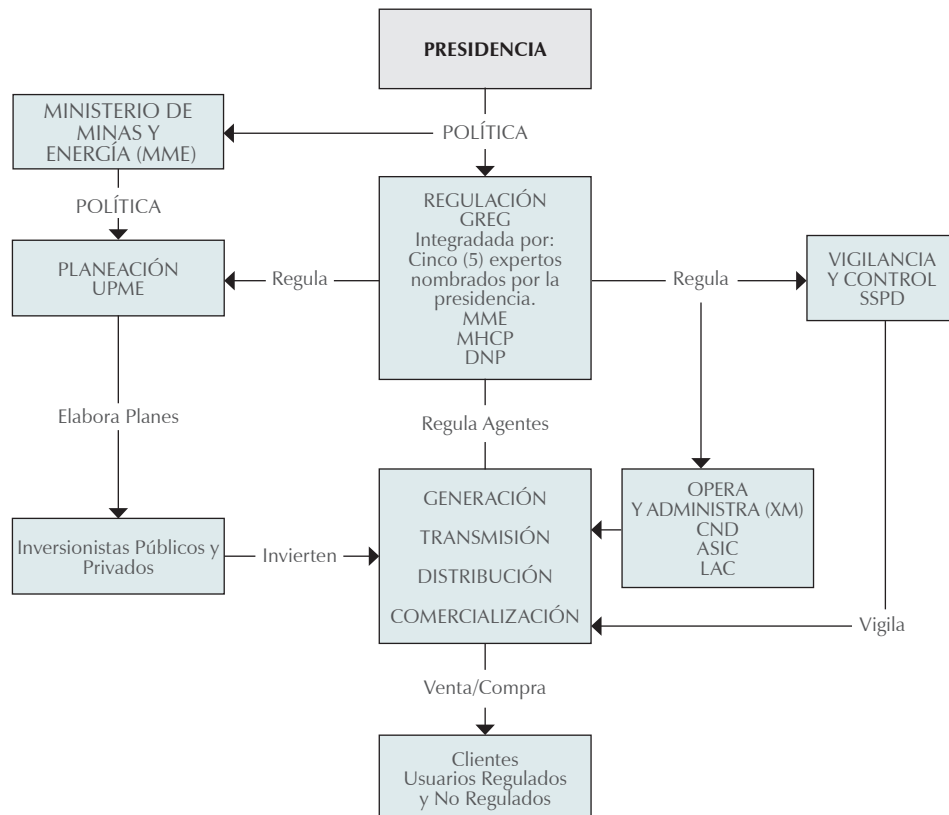
El Gráfico 1 muestra la estructura institucional del mercado eléctrico en Colombia. En él se puede observar que la política del sector está a cargo del Ministerio de Minas y Energía (MME), quien tiene a su cargo la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), entidad encargada de elaborar la planeación de la inversión y expansión de este sector. La CREG regula a los agentes que participan en el mercado eléctrico; la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) vigila y controla las actividades de los agentes generadores, transmisores, distribuidores y comercializadores de energía eléctrica; y, finalmente, el mercado de energía está compuesto por los agentes que operan en él y por los usuarios regulados y no regulados⁵.

De acuerdo con la Ley 143, el sector de energía eléctrica se divide en cuatro actividades principales: generación, transmisión, distribución y comercialización. Estas actividades constituyen la cadena productiva de la energía eléctrica:

- **Generación:** consiste en la producción de energía eléctrica. La energía en nuestro país se genera a través de plantas hidráulicas, térmicas o eólicas que están conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN). En Colombia, el 66% de la energía se produce mediante plantas hidráulicas, el 28% mediante plantas térmicas de gas, el 5% mediante plantas térmicas de carbón y el 0,2% se genera mediante plantas eólicas. Es de notar que esta actividad se caracteriza por la libre negociación de precios en la bolsa por parte de las empresas generadoras y distribuidoras de energía, lo cual es una característica de un mercado competitivo. Sin embargo, el monto de las inversiones necesarias hace que el acceso a la actividad de generación tenga grandes barreras.
- **Transmisión:** consiste en el transporte o conducción de energía eléctrica a alto voltaje a través del Sistema de Transmisión Nacional (STN). El STN comprende

⁵ De acuerdo con la definición establecida por la CREG, los usuarios regulados son personas naturales o jurídicas cuyas compras de electricidad están sujetas a tarifas establecidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas. Aquí está la mayoría de usuarios comerciales, algunos industriales, oficiales y los residenciales clasificados por estratos socioeconómicos. Asimismo, define usuarios no regulados como personas naturales o jurídicas que realizan una demanda de energía superior a dos megavatios (2 MW). Ellos pueden negociar libremente los costos de las actividades relacionadas con la generación y comercialización de energía. En este nivel de consumo están los usuarios industriales y comerciales.

Gráfico 1 Estructura Institucional



Fuente: Elaborado con base en: CREG y UPME.

el conjunto de líneas y subestaciones con sus equipos asociados y los transformadores con sus módulos de conexión que operan a tensiones entre 220 y 500 kilovoltios (kV). Esta actividad es de carácter monopólico, aunque a partir de las reformas se ha incentivado la competencia, buscando la expansión del sistema. Actualmente, existe libre acceso a las redes y cargos por uso del STN y éstos están regulados por la CREG. La transmisión es efectuada por nueve empresas, siendo la principal la empresa pública Interconexión Eléctrica S. A. E. S. P. (ISA), propietaria de cerca del 75% de los activos de la red.

- **Distribución:** corresponde a la conducción y entrega de energía eléctrica a los centros de consumo. La energía eléctrica se conduce al usuario final a través

de los Sistemas de Transmisión Regional (STR) y los Sistemas de Distribución Local (SDL). Estos sistemas están compuestos por conjuntos de líneas y sub-estaciones, con sus equipos asociados, que operan a tensiones inferiores a 220 kV. El STR es un sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica compuesto por redes regionales o interregionales de transmisión, en tanto que el SDL involucra las redes de distribución municipal o distrital. En particular, la actividad de distribución incluye el transporte de electricidad a los usuarios y la instalación, operación y mantenimiento de los equipos.

- **Comercialización:** esta actividad consiste en la compra de energía eléctrica en el mercado mayorista y su venta a los usuarios finales, regulados o no regulados. Los usuarios no regulados son, por lo general, las industrias de alto consumo que se denominan así porque están en libertad de comprar la energía al comercializador de su preferencia o directamente a los generadores. A diferencia de éstos, los usuarios regulados compran la energía eléctrica a la empresa comercializadora del municipio o sector donde se encuentran ubicados y esta empresa debe acogerse a las fórmulas tarifarias que establece la CREG para el cobro de energía a este tipo de usuarios.

La remuneración para cada una de estas actividades está incluida en el costo unitario de prestación del servicio. De acuerdo con la información suministrada por la CREG, el costo del servicio es la suma de los costos de cada una de las etapas (producción, transmisión, distribución, comercialización y administración). Para el período 2003- 2007 esta estructura es definida por la Resolución CREG 047 de 2002, donde los costos unitarios de prestación del servicio están definidos en forma unitaria (\$/kWh) y están asociados con los costos en los que incurre la empresa para el desarrollo de su actividad de comercialización a usuarios regulados, en cada uno de los mercados de comercialización, por niveles de tensión y con todas las demás variables que caracterizan la prestación del servicio. Dado lo anterior, la fórmula para el costo unitario de prestación del servicio del mes m , del año t y del nivel de tensión n es:

$$CU_{m,t,n} = \frac{G_m + T_m + O_m}{[1 - PR_{t,n}]} + \bar{R}_m + D_{m,t,n} + C_m + I_m \quad (1)$$

Donde:

$CU_{m,t,n}$: costo unitario de prestación del servicio (\$/kWh) para los usuarios conectados al nivel de tensión n , correspondiente al mes m del año t .

G_m : costos de compra de energía (\$/kWh).

T_m : costo promedio por uso del STN (\$/kWh), correspondiente al mes m .

O_m : costos adicionales del mercado mayorista (\$/kWh), correspondiente al mes m .

$\overline{R_m}$: costo de restricciones y servicios complementarios.

$D_{m,t,n}$: costo de distribución (\$/kWh). Cargo por uso de STR y/o SDL, correspondiente al mes m del año t en el nivel de tensión n .

C_m : costo de comercialización (\$/kWh), correspondiente al mes m del año t .

I_m : impuestos nuevos trasladados al usuario en el mes m , expresados en \$/kWh.

$PR_{t,n}$: fracción (o porcentaje expresado como fracción) de pérdidas de energía en el nivel de tensión n , reconocidas durante el año 09/19/09.

La fórmula tarifaria para este período adiciona el componente de los impuestos y se consideran por separado los costos asociados con las restricciones asignadas al comercializador, tales como servicios de arranque de emergencia, servicio de energía reactiva, etc. Estos costos en el período tarifario de 1998-2002 se encontraban en el componente $O_{m,t}$. Cabe resaltar que de acuerdo con la Ley 142 de 1994, Artículo 126, la vigencia de las fórmulas tarifarias es de cinco años, antes de los cuales solamente podrán ser modificadas en los eventos expresamente señalados en esta norma.

Como se ha mencionado antes, este estudio se centra en el sector de distribución porque éste es el que cierra la cadena de la industria eléctrica y, en general, por ser su motor de desarrollo pues tiene relación directa con los usuarios, recauda la mayor parte de los ingresos y sostiene financieramente las actividades de transmisión y generación.

La importancia del estudio de la eficiencia en el sector de distribución de energía eléctrica radica en que estas empresas operan como monopolios naturales locales. La teoría económica enseña que si se los deja sin control, éstos tienen la capacidad de ejercer su poder de mercado y fijar precios por encima de los costos para obtener beneficios supranormales (Coelli *et al.*, 2003). Dado lo anterior, el marco regulatorio actual promueve la participación de capital privado en el sector y procura

para que las tarifas que se cobran a los usuarios regulados se aproximen a lo que serían los precios de un mercado competitivo⁶. Así, en la medida en que las empresas distribuidoras de energía mejoren su productividad —que tiene como base la eficiencia— habrá costos más bajos y, por ende, menores tarifas para los usuarios.

B. CARACTERÍSTICAS DE LA INDUSTRIA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

La industria de distribución de energía en Colombia comprende 32 empresas⁷, de las cuales el 30% es de carácter privado, el 26% de carácter público y el 44% de carácter mixto⁸. Actualmente, las compañías de distribución están licenciadas por la CREG para distribuir y vender electricidad a los usuarios en un área de distribución específica (ADD)⁹ y se comportan como monopolios naturales locales. Algunas de las empresas de distribución están integradas verticalmente con plantas de generación de energía, como es el caso de la Empresa de Energía del Pacífico (EPSA)¹⁰, pero la mayoría compra su electricidad por medio de contratos a largo plazo¹¹.

Los distribuidores de energía proveen servicios de electricidad a diferentes categorías de consumidores. Estas categorías pueden clasificarse en: consumidores de bajo voltaje vs. consumidores de alto voltaje; consumidores de áreas rurales vs. consumidores de áreas urbanas; y consumidores industriales, comerciales, residenciales, etc.

En el Gráfico 2 se presenta la composición del consumo de energía por sectores. Allí se observa que el sector residencial es el mayor consumidor de energía (44%), seguido por el sector industrial (32%).

6 Resolución CREG 082 de 2002.

7 El Anexo 1 contiene el listado de las empresas distribuidoras de energía que han sido incluidas en las estimaciones.

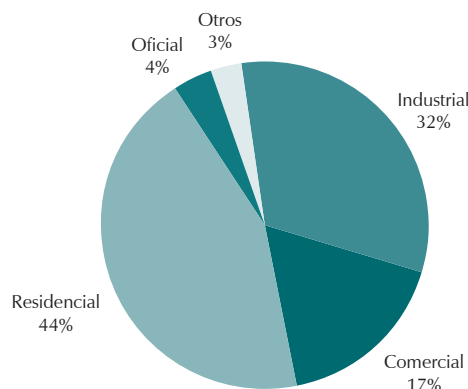
8 Información suministrada por la empresa XM.

9 Estas áreas de distribución fueron designadas en la Resolución 389 de 2007.

10 De acuerdo con información publicada en la página web www.epsa.com.co, los cuatro negocios básicos de EPSA son, desde su creación, la generación, la transmisión, la distribución y la comercialización de la energía para el Valle del Cauca, excepto Cali, Yumbo y Cartago.

11 En este tipo de contratos, el comprador se compromete a pagar toda la energía contratada para un determinado período de tiempo a una determinada tarifa, independiente de que ésta se consuma efectivamente. Si el comprador contrató una cantidad que excede sus compromisos comerciales, vende la diferencia en la bolsa.

Gráfico 2
Consumo por sectores



Fuente: UPME.

Según la CREG, en los costos máximos unitarios en los que se incurre para suministrar electricidad al consumidor final, en promedio, la generación tiene una participación del 33%, la transmisión del 9%, la distribución del 46%, la comercialización del 9% y los costos de operación el 3%. Es así como la remuneración en la distribución eléctrica representa un componente significativo del costo unitario de prestación del servicio.

El Cuadro 1 muestra que el 91,6% de los usuarios son residenciales. Además, la mayor parte de las empresas de distribución de energía son públicas y el número de agentes distribuidores para el período 2004-2007 se ha mantenido en 32; en promedio estas empresas emplean a 505 personas y el costo salarial en miles de pesos fue \$163.017 para este mismo período.

Dadas las características de monopolio natural local que poseen las empresas pertenecientes al sector de distribución eléctrica, es relevante el estudio de los mecanismos de regulación que se implementan en Colombia ya que, como se mencionó, ésta es una de las principales razones por las cuales el Estado debe procurar que las tarifas cobradas al usuario final se aproximen a las que se generarían en un mercado competitivo porque, de lo contrario, y de acuerdo con la estructura tarifaria presentada en esta sección, los usuarios enfrentarían sobrecostos si las empresas que distribuyen energía no son eficientes.

Cuadro 1
Estadística Descriptiva del Sector

	Promedio
Total Usuarios	8.584.720
Industrial	66.042 (0.77%)
Comercial	580.094 (7.75%)
Residencial	7.871.964 (91.6%)
Alumbrado	4.541
Oficial	47.086
Otros	14.994
% Participación Pública	67%
% Participación Privada	33%
Número de Agentes Distribuidores	32
Número de Empleados	505

Fuente: CREG, XM, UPME

C. METODOLOGÍAS DE REMUNERACIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN

La metodología establecida en la Resolución CREG 013 de 2002 considera principalmente las diferencias en la estructura de costos de las empresas distribuidoras; si atienden mercados rurales o urbanos y los niveles de tensión suministrados a los usuarios. Es importante aclarar que los costos en los que incurre una empresa que presta el servicio en un mercado rural se ven afectados por la dispersión geográfica de los usuarios. Asimismo, una empresa que atiende un mercado urbano incurre en costos que provienen del hurto de energía (el más difícil de rastrear en una zona muy poblada), de la arborización y de factores culturales¹². Los niveles de tensión, de acuerdo con la Resolución CREG 082 de 2002, se clasifican así:

- Nivel de tensión 4 (grandes industrias): $57,5 \text{ kV} \leq \text{tensión nominal} < 220 \text{ kV}$.
- Nivel de tensión 3 (pequeña y mediana industria): $30 \text{ kV} \leq \text{tensión nominal} < 57,5 \text{ kV}$.
- Nivel de tensión 2 (pequeña y mediana industria y comercio): $1 \text{ kV} \leq \text{tensión nominal} < 30 \text{ kV}$.
- Nivel de tensión 1 (residencias): $\text{tensión nominal} < 1 \text{ kV}$.

¹² En épocas de lluvia, tanto los árboles como las cometas que se quedan atascadas en las líneas que conducen energía provocan daño en los circuitos o en los equipos de protección, lo que genera cortes en el suministro de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, existen dos metodologías de remuneración para la distribución de energía eléctrica:

Metodología de ingreso máximo: la CREG establece los ingresos que se requieren para remunerar los activos de uso¹³ del nivel de tensión 4 para cada operador de red y también los activos de conexión al STN que sirven para calcular los cargos de los STR. El cálculo tarifario anual de acuerdo con esta metodología considera los cambios en la demanda y en la inversión dentro de una tarifa regional única.

Metodología de precio máximo: la CREG aprueba los cargos máximos por unidad de energía transportada en los niveles 1, 2 y 3 de su sistema para cada operador de red. Según Coelli *et al.* (2003), la regulación por precios máximos especifica la máxima tasa a la que pueden cambiar los precios regulados, después de ajustar por inflación, en un determinado período de tiempo. Este tipo de regímenes regulatorios tiene como fin promover la eficiencia entre los operadores, ya que si la empresa puede mantener los incrementos de costos por debajo del incremento de precios permitido (precio máximo), puede embolsar la diferencia y de este modo obtener ganancias extraordinarias, es decir, una tasa más alta de rendimiento sobre el capital. De esta forma, el Estado genera incentivos para que las empresas distribuidoras de energía procuren ser técnicamente eficientes y productivas.

III. MARCO TEÓRICO

Las posibilidades de producción de una firma pueden ser analizadas a través de la tecnología de producción (para el caso de múltiples insumos y múltiples productos) o de la función de producción (para el caso de un producto y uno o más insumos). Asimismo, pueden ser estudiadas a partir de las funciones de costos y derivar de éstas las funciones de demanda de los insumos¹⁴, o ser también estudiadas considerando la función de ingresos o la función de beneficios y derivar de esta última la función de

¹³ Los activos de uso de STR y SDL son aquellos activos de transmisión de electricidad que operan a tensiones inferiores a 220 kV. Se clasifican en unidades constructivas, no son de conexión y son remunerados mediante cargos por uso de STR o SDL. Los activos de conexión se remuneran a través de contratos entre el propietario y los usuarios respectivos y atienden a los transportadores de energía. Los activos de uso se utilizan para atender usuarios finales.

¹⁴ Usando el lema de Shephard.

demanda de insumos y de oferta del producto¹⁵. Los anteriores métodos son también útiles en la medición de la eficiencia y la productividad. En otras palabras, a través de la tecnología de producción, la función de costos, la función de ingreso o la función de beneficios es posible analizar la relación entre los insumos y el nivel de producción o estudiar aquellos aspectos que vinculan los insumos con el producto, como por ejemplo, la productividad (entendida como la relación que hay entre los insumos y el producto dada una tecnología).

A continuación se tratarán los aspectos teóricos más relevantes relacionados con las posibilidades de producción, las medidas de eficiencia y la productividad de una empresa para construir un marco teórico de referencia con el cual analizar la eficiencia en las empresas que distribuyen energía en Colombia.

A. TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN

Para representar la relación que hay en un proceso productivo entre múltiples insumos y múltiples productos se hace referencia al conjunto de tecnología de producción. Además, se sigue una notación vectorial. En otras palabras, el conjunto de producción muestra un mecanismo para relacionar la producción con los insumos. La tecnología de producción se define como:

$$S = \{(\mathbf{x}, \mathbf{q}) : \mathbf{x} \text{ produce } \mathbf{q}\} \quad (2)$$

Donde el conjunto de tecnología de producción, S , está formado por un vector de insumos \mathbf{x} de dimensión $N \times 1$, mientras que \mathbf{q} es un vector de productos de dimensión $M \times 1$ ¹⁶. Por otra parte, y de manera equivalente, la tecnología de producción puede ser descrita a través de un conjunto de insumos¹⁷. Ésta consiste en todos los vectores de insumos que pueden producir un vector de productos dado y se define como:

$$L(\mathbf{q}) = \{\mathbf{x} : \mathbf{x} \text{ puede producir } \mathbf{q}\} = \{\mathbf{x} : (\mathbf{x}, \mathbf{q}) \in S\} \quad (3)$$

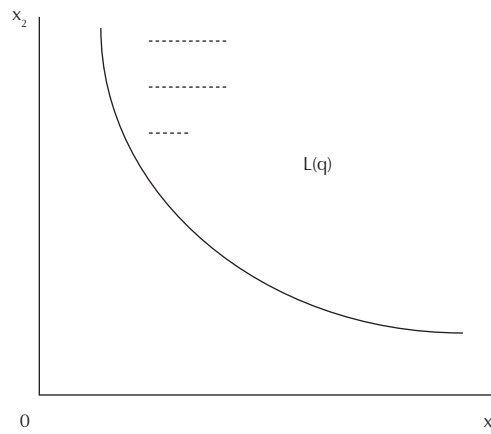
¹⁵ Usando el lema de Hötelling.

¹⁶ Los elementos de estos vectores son números reales no negativos.

¹⁷ La tecnología de producción puede ser descrita, también, a través de un conjunto de producción, $\mathbf{P}(\mathbf{x})$, definido como $\mathbf{P}(\mathbf{x}) = \{\mathbf{q} : \mathbf{x} \text{ produce } \mathbf{q}\} = \{\mathbf{q} : (\mathbf{x}, \mathbf{q}) \in S\}$. Para más detalles véase Coelli *et al.*, 2005.

Esto es similar a una isocuanta en el caso de dos insumos y un producto, donde la isocuanta mostrará las combinaciones de los insumos x_1 y x_2 que producen un vector de producción dado, \mathbf{q} . Su representación se puede ver en el Gráfico 3.

Gráfico 3
Isocuanta



Fuente: Kumbhakar y Lovell (2000).

El conjunto de insumos debe cumplir las siguientes propiedades¹⁸:

1. $\notin L(\mathbf{q})$ para $q \geq 0$ y $L(0) = R_+^N$
2. Disponibilidad débil de insumos, si $\mathbf{x} \in L(\mathbf{q})$, entonces para todo $\lambda \geq 1$, $\lambda \mathbf{x} \in L(\mathbf{q})$.
3. Disponibilidad fuerte de insumos, si $\mathbf{x} \in L(\mathbf{q})$ y si $\mathbf{x}^* \geq \mathbf{x}$, entonces $\mathbf{x}^* \in L(\mathbf{q})$.
4. $L(\mathbf{q})$ es cerrado.
5. $L(\mathbf{q})$ es convexo.

La primera de estas propiedades señala que con cero insumos no es posible tener un nivel de producción mayor que cero; no es posible producir algo con cero insumos. La segunda propiedad implica que si se aumenta la cantidad de todos los insumos en la misma proporción se puede seguir produciendo con el nuevo vector de insumos;

¹⁸ La propiedad 1 está basada en Kumbhakar y Lovell (2000).

con una mayor cantidad de todos los insumos se producen los mismos bienes que antes. La propiedad número tres señala que si aumentamos la cantidad de por lo menos un insumo del vector de insumos es posible seguir produciendo el mismo vector de productos. La cuarta implica que la isocuanta (en el caso de dos insumos) hace parte del conjunto de insumos. Finalmente, la quinta propiedad señala que cualquier combinación lineal de los insumos pertenece al conjunto de insumos.

La tecnología de producción puede ser expresada a través del conjunto de tecnología de producción, o por el conjunto de producción o por el conjunto de insumos. En otras palabras, estos últimos están relacionados pues ambos muestran descripciones de la misma tecnología subyacente¹⁹, es decir, contienen la misma información sobre la tecnología.

B. FUNCIONES DE DISTANCIA DE INSUMOS Y DE PRODUCTOS

Las funciones de distancia²⁰ orientadas a los insumos o a los productos sirven para caracterizar la tecnología de producción en empresas multiproducto y multiinsumo. Además, como lo señalan Kumbhakar y Lovell (2000), su importancia teórica radica en su propiedad de dualidad. Según esta propiedad, bajo condiciones de certeza una función de distancia de insumo es dual a la frontera de costos y una función de distancia de producto es dual a la frontera de ingreso. El valor empírico de las funciones de distancia está en que sirven para medir econométricamente la eficiencia técnica en el caso de múltiples insumos y múltiples productos, o como lo señalan Coelli *et al.* (2005) “las funciones de distancia son muy útiles en la descripción de la tecnología pues hacen posible medir la eficiencia y la productividad”²¹.

1. Funciones de distancia orientadas al producto

La función de distancia orientada al producto considera una expansión proporcional máxima del vector de productos dado un vector de insumos. En otras palabras, está relacionada con la producción máxima dado un vector de insumo constante.

¹⁹ Si $\mathbf{q} \in p(\mathbf{x})$, \mathbf{q} puede ser producido utilizando un vector \mathbf{x} y entonces $\mathbf{x} \in L(\mathbf{q})$ (Coelli *et al.*, 2005).

²⁰ Malmquist (1953) y Shephard (1953).

²¹ Traducción libre.

La función de distancia orientada al producto se define sobre el conjunto de productos como:

$$d_o(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \min \{ \delta : (\mathbf{q}/\delta) \in \mathbf{P}(\mathbf{x}) \} \quad (4)$$

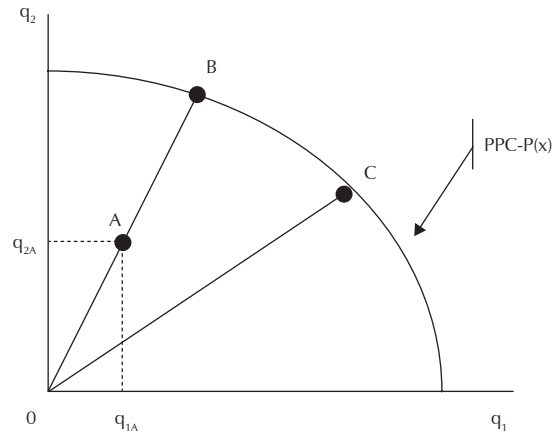
y cumple las siguientes propiedades:

1. $d_o(\mathbf{x}, 0) = 0$ para todo vector no negativo de \mathbf{x} .
2. $d_o(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ es no decreciente en \mathbf{q} y no creciente en \mathbf{x} .
3. $d_o(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ es linealmente homogéneo en \mathbf{q} .
4. $d_o(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ es cuasiconvexo en \mathbf{x} y convexo en \mathbf{q} .
5. $\mathbf{q} \in p(\mathbf{x})$, entonces $d_o(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \leq 1$.
6. $d_o(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 1$ si $\mathbf{q} \in p(\mathbf{x})$, donde toma el valor de 1 si está sobre la frontera.

El Gráfico 4 ilustra una función de distancia orientada a dos productos, q_1 y q_2 , dado un vector de insumos \mathbf{x} . El conjunto de posibilidades de producción es toda el área entre los dos ejes, q_1 y q_2 , y la frontera de posibilidades de producción, PPC-P(\mathbf{x})²². El valor de la función de distancia para la firma, usando el vector de insumo \mathbf{x} para producir el producto definido en el punto A, es igual a la relación $\delta = OA/OB$. Es importante observar que entre más cercano a cero esté el valor de la función de distancia, δ , más alejado estará el producto definido (producto del vector de insumos \mathbf{x}) de PPC-P(\mathbf{x}). Si $\delta = 1$, el producto definido está sobre PPC-P(\mathbf{x}).

²² PPC-P(\mathbf{x}) es la notación que utilizan Coelli et al. (2005) para referirse al conjunto de posibilidades de producción.

Gráfico 4
Función de distancia orientada al producto



Fuente: Coelli et al. (2005)

2. Funciones de distancia orientadas a los insumos

La función de distancia orientada a los insumos caracteriza la tecnología de producción, considerando una reducción proporcional mínima del vector de insumos, para un vector de producto dado. Esta función se define como:

$$d_i(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \max \{ \rho : (\mathbf{x}/\rho) \in L(\mathbf{q}) \} \quad (5)$$

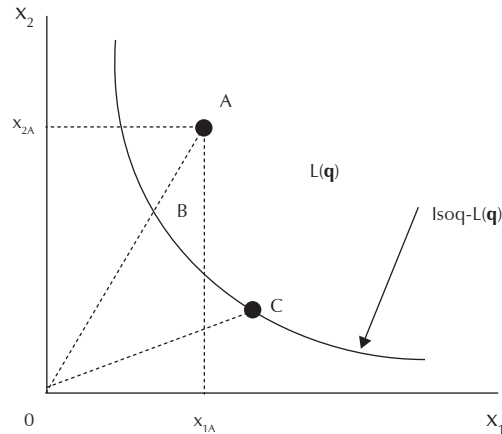
El conjunto de insumos representa el conjunto de todos los vectores de insumos $L(\mathbf{q})$ que pueden producir el vector de productos, \mathbf{q} . Las funciones de distancia cumplen las siguientes propiedades:

1. $d_i(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ es no decreciente en \mathbf{x} y no creciente en \mathbf{q} .
2. Es linealmente homogénea en \mathbf{x} .
3. $d_i(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ es cóncava en \mathbf{x} y cuasicóncava en \mathbf{q} .
4. $\mathbf{x} \in L(\mathbf{q})$, entonces $d_i(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \geq 1$.
5. $d_i(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 1$ si $\mathbf{x} \in L(\mathbf{q})$.

El Gráfico 5 ilustra una función de distancia orientada a los insumos, x_1 y x_2 , dado un vector de producto q . El conjunto de insumos $L(q)$ es el área que está por encima de la isocuanta²³. El valor de la función de distancia para el punto A define el punto de producción cuando la firma usa x_{1A} de insumo 1 y x_{2B} de insumo 2 para producir el vector de productos q . Éste equivale a la ratio $\rho = {}^{0A}/{}^{0B}$. Las funciones de distancia de producto e insumo están conectadas por dos resultados.

1. Si $q \in P(x)$, entonces $x \in L(q)$. Es decir, si el vector de productos pertenece al conjunto de posibilidades de producción asociado con un vector de insumos, entonces el vector de insumos pertenece a un conjunto de insumos viable asociado con un vector de productos.
2. Si los insumos y los productos son débilmente disponibles se afirma que $d_i(x, q) \geq 1$ si y sólo si $d_o(x, q) \leq 1$. Si la tecnología presenta rendimientos constantes a escala se afirma que $d_i(x, q) = 1/d_o(x, q)$ para todo x y q .

Gráfico 5
Función de distancia orientada a los insumos



Fuente: Coelli et al. (2005).

²³ Isoq-L(q) es la notación que utilizan Coelli et al. (2005) para referirse al conjunto de insumos requeridos.

C. MEDIDAS DE EFICIENCIA

Como ya se ha señalado, el objetivo central de este documento es plantear un mecanismo que permita medir la eficiencia técnica en la distribución de energía en Colombia. Cuando en este documento se habla de eficiencia se piensa en la productividad total de los factores productivos (PTF), definida como el cociente entre el índice de productos y el índice de insumos. Pero cabe anotar que cuando se tienen múltiples insumos y múltiples productos la PTF puede diferir principalmente por la eficiencia técnica (ET) y la eficiencia asignativa (EA). La ET hace referencia a la capacidad de una firma para maximizar el producto con un conjunto de insumos dado, mientras que la EA refleja la capacidad de la empresa para usar el insumo en proporciones óptimas o para producir la combinación óptima de productos dados sus precios y la tecnología de producción. Este documento se concentrará principalmente en medidas de eficiencia técnica ya que las empresas del sector eléctrico rara vez tienen control sobre la asignación de insumos o productos; por ejemplo, la intensidad de capital de las empresas de redes está determinada por la densidad de la población. En cuanto a la eficiencia asignativa en producto, para estas empresas es difícil alterar la combinación de productos; por ejemplo, una combinación de clientes de nivel de tensión 4 y clientes de nivel de tensión 1. A continuación se presentan las medidas de eficiencia orientadas a los insumos y las medidas de eficiencia orientadas al producto.

1. Medidas de eficiencia orientadas a los insumos

Coelli *et al.* (2005) ilustran la medida de eficiencia, siguiendo un ejemplo presentado por Farrell (1957), a partir de la consideración de dos insumos, x_1 y x_2 , para producir un único producto y definen la eficiencia técnica como:

$$ET = OQ/O_P \quad (6)$$

Específicamente, si asumimos que existe una isocuanta SS' que está relacionada con las distintas combinaciones de insumos que producen eficientemente el único bien q (véase Gráfico 6) y si una firma usa cantidades de insumos definidos por el punto P para producir q , la ineficiencia está representada por la distancia QP . Esta distancia señala que una firma que emplea una combinación de más insumos (x_{1P} y x_{2P}) para producir el mismo producto q es ineficiente pues es posible producir el mismo producto, en el punto Q , con una combinación de menos insumos (x_{1Q} y x_{2Q}). Esta ineficiencia expresada en términos porcentuales será igual a la relación QP/O_P .

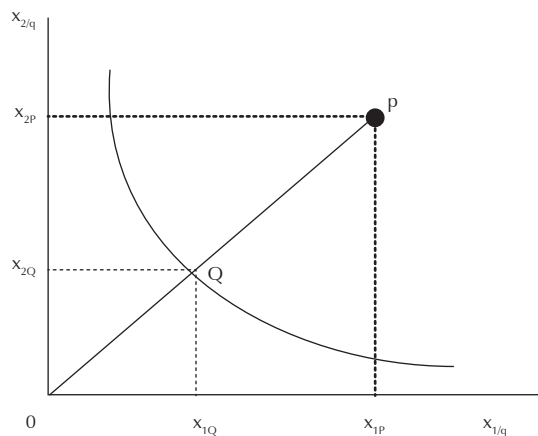
Esta relación mide el porcentaje en que se debe reducir el uso de los insumos para alcanzar la eficiencia; en particular, si $\frac{QP}{OP} \rightarrow 0$ la firma es más eficiente.

Por otra parte, la ineficiencia expresada por la distancia QP puede ser utilizada para expresar la medida de eficiencia técnica así: $ET = 1 - QP/OP$; es decir, el porcentaje de eficiencia más el porcentaje de ineficiencia suman uno. Además, como $QP = OP - OQ$, entonces $ET = 1 - \frac{OP - OQ}{OP} = 1 - 1 + \frac{OQ}{OP} = \frac{OQ}{OP}$.

La eficiencia técnica toma valores entre cero y uno; por lo tanto, proporciona el grado de eficiencia técnica de la firma. En otras palabras, si $ET = 1$, entonces es completamente eficiente y si $0 < ET < 1$, entonces es ineficiente.

Finalmente, la medida de eficiencia técnica orientada a los insumos y pensada para dos productos puede ser expresada en términos de la función de distancia orientada a los insumos y generalizarse para múltiples insumos con múltiples productos.

Gráfico 6
Eficiencia técnica orientada al insumo



Fuente: Elaborado con base en Coelli *et al.* (2005).

Para el caso de dos insumos y un vector de productos, la función de distancia se definió como $\rho = \frac{OA}{OB}$ (véase la sección sobre funciones de distancia orientadas a los insumos, Gráfico 5). Por analogía con el Gráfico 6 podemos señalar que $\rho = \frac{OA}{OB} \Rightarrow \frac{OP}{OQ}$; por lo tanto, para la definición de eficiencia técnica sería $ET = \frac{OQ}{OP} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho}$.

Para el caso de múltiples insumos y múltiples productos:

$$ET = 1/d_I(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \quad (7)$$

es decir, el inverso de la función de distancia orientada a los insumos sirve para medir la eficiencia técnica orientada a los insumos. Si en una firma $d_I(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 1$, entonces $ET = 1$. Esto indica que la empresa es técnicamente eficiente²⁴.

D. ANÁLISIS DE FRONTERA ESTOCÁSTICA

Las medidas de eficiencia discutidas en la sección anterior asumen la función de producción o tecnología de producción como dada. Sin embargo, éstas deben ser estimadas. De acuerdo con Coelli y Perelman (2000), las fronteras de producción y las funciones de distancia fueron estimadas usando una variedad de métodos. Éstos incluyen el análisis de la frontera estocástica (SFA), el método de programación lineal paramétrica (PLP), los mínimos cuadrados ordinarios corregidos (COLS) y el análisis de la envolvente de datos (DEA). Estos métodos son discutidos y comparados en Coelli y Perelman (1996, 1999). Es relevante aclarar que los más aplicados hoy en día para la estimación de la eficiencia técnica y del cambio tecnológico son el DEA y el SFA. Este estudio implementa la técnica de análisis de frontera estocástica (SFA).

El análisis de frontera estocástica (SFA) es un método alternativo para estimar la frontera de producción que asume una forma funcional dada para la relación entre los insumos y un producto (Coelli *et al.*, 2005). Éste, a diferencia del análisis de la envolvente de datos (DEA), tiene presente que las firmas pueden estar por debajo de la frontera estimada, no sólo por ineficiencia técnica, sino también debido a factores como errores de medición, omisión de variables relevantes y otras fuentes de ruido estadístico como el clima, las huelgas, los factores culturales, etc. Es decir, la ventaja del SFA es que no asume que todas las desviaciones de la frontera son resultado de la ineficiencia técnica. Es de notar que el método DEA es computacionalmente simple y no supone una forma funcional para la frontera o una distribución particular para el término de ineficiencia. Además, puede manejar el caso de múltiples productos con facilidad (Coelli *et al.*, 2003).

²⁴ Si se conocen los precios de los insumos es posible construir un indicador de la eficiencia de costos que lleva a una medida de la eficiencia asignativa (véase Coelli *et al.*, 2005).

El análisis de frontera estocástica es un método econométrico que estima una frontera de producción de la forma:

$$y = f(x) + v - u \quad (8)$$

donde y es el producto, $f(x)$ son todos los insumos que constituyen la parte determinística del modelo, v es un término de error que captura perturbaciones impredecibles o el ruido estadístico (ya que las desviaciones de la frontera no son de total control del productor) y u capta la ineficiencia técnica y por esta razón sólo toma valores no negativos. Así, si alguna firma es completamente eficiente, $u = 0$ y las desviaciones con respecto a la frontera son completamente aleatorias.

Los modelos de frontera pueden ser estimados con datos de corte transversal, es decir, con datos de la industria en un período dado de tiempo o con datos en panel. Los datos en panel contienen por lo general más observaciones que los datos de corte transversal pues combinan las series de tiempo de las observaciones transversales, de acuerdo con Coelli *et al.* (2005). Ésta es la principal razón por la que con datos en panel se espera obtener estimadores más eficientes de los parámetros desconocidos y predictores más eficientes de las eficiencias técnicas. Además, la estimación con datos en panel permite:

- Estudiar la dinámica del cambio tecnológico.
- Obtener predicciones consistentes de la eficiencia técnica.
- Relajar algunos supuestos fuertes acerca de la distribución de los errores, que es necesario imponer para separar los efectos de la ineficiencia y el ruido.
- Más variabilidad, menos colinealidad entre las variables, más grados de libertad y una mayor eficiencia.

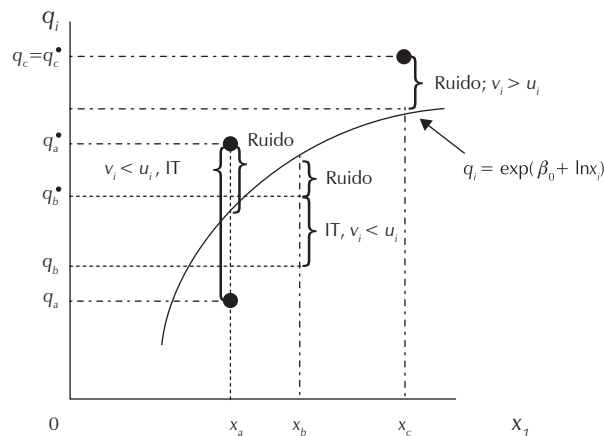
El modelo de frontera de producción en la versión de datos en panel de Aigner, Lovell y Schmidt (1977) puede ser escrito en la forma general:

$$\ln q_{it} = x'_{it} \beta + v_{it} - u_{it} \quad (9)$$

donde $\ln q_{it}$ es el logaritmo del producto de la i -ésima firma en el período t , x'_{it} es el vector $K \times 1$ que contiene los logaritmos de los insumos, v_{it} es el error aleatorio que se supone idéntico e distribuido de manera independiente y normal con media cero y varianza σ^2 (es decir, $v_{it} \sim iidN(0, \sigma_v^2)$) y u_{it} es la variable no negativa asociada con la ineficiencia técnica, la cual se estima bajo el supuesto de que es idéntica y distribuida de manera independiente y normal truncada en cero con media μ y varianza σ^2 (es decir, $u_{it} \sim iidN^+(\mu, \sigma_u^2)$).

Esta frontera se presenta en el Gráfico 7, donde se muestra la relación entre insumos y productos de tres firmas (A, B y C) y donde el componente determinístico del modelo de frontera fue dibujado para reflejar la existencia de retornos decrecientes a escala. Los valores de los insumos son medidos a lo largo del eje horizontal y los valores de los productos a lo largo del eje vertical. La empresa A utiliza x_a insumos para producir q_a , la empresa B utiliza x_b insumos para producir q_b y la empresa C utiliza x_c insumos para producir q_c .

Gráfico 7
Frontera estocástica



Fuente: Elaborado con base en Coelli et al. (2005).

En el Gráfico 7 se puede observar que si se asume que no hay efectos de ineficiencia, $u = 0$, las firmas A y C se mantienen por encima de la parte determinística de la frontera porque el efecto del ruido es positivo, mientras que la empresa B se mantiene por debajo de la frontera porque el efecto del ruido es negativo.

Si se consideran los efectos de la ineficiencia, las empresas A y B se ubican por debajo de la frontera debido a que la variable que mide la ineficiencia es mayor que el término aleatorio, es decir, $v_{it} - u_{it} < 0$. La empresa C se mantiene por encima de la parte determinística de la frontera debido a que el efecto del ruido es positivo y porque es una firma completamente eficiente, $u_{it} = 0$, y por lo tanto $v_{it} - u_{it} > 0$.

El análisis de frontera estocástica está dirigido a la predicción de los efectos de ineficiencia. La medida de eficiencia orientada a los productos es la más común y se define como la razón entre producto observado y el correspondiente producto de la frontera estocástica:

$$TE = \frac{q_{it}}{\exp(x'_{it}\beta + v_{it})} = \frac{\exp(x'_{it}\beta + v_{it} - u_{it})}{\exp(x'_{it}\beta + v_{it})} = \exp(-u_{it}) \quad (10)$$

De acuerdo con Coelli *et al.* (2005), ésta es la medida del producto de la i -ésima firma con respecto al producto que podría producir si la firma fuera completamente eficiente usando el mismo vector de insumos. La eficiencia técnica toma valores entre cero y uno, donde 1 indicará que la empresa es totalmente eficiente. El primer paso para predecir la eficiencia técnica es estimar los parámetros de la frontera de producción estocástica o de la función de distancia orientada al producto.

Aunque cuando se tienen datos en panel es conveniente asumir, para fines de estimación, que los u_{it} están distribuidos de manera independiente, esto no permite obtener ninguno de los beneficios listados arriba. Además, para muchas empresas el supuesto de independencia no es realista pues se espera que las firmas que son eficientes lo sigan siendo de período a período y que las firmas que son ineficientes mejoren sus niveles de eficiencia en el tiempo. Por esta razón, es necesario imponer alguna estructura sobre los efectos de ineficiencia. Se consideran dos tipos de estructuras: modelos de ineficiencia invariantes en el tiempo y modelos de ineficiencia que varían en el tiempo. La estimación de ambos modelos se puede realizar a través de los enfoques de efectos fijos o de efectos aleatorios.

1. Modelos de ineficiencia invariantes en el tiempo

Este tipo de estructura es simple y algo restrictiva pues asume que los efectos de ineficiencia técnica no cambian en el tiempo, es decir, asume que las firmas que son ineficientes no tienen procesos de aprendizaje que les permiten ser más eficientes.

Este modelo supone que los niveles de eficiencia varían entre firmas, pero son constantes a través del tiempo. Es decir, supone que no existe cambio tecnológico.

$$\begin{aligned} u_{it} &= u_i \\ i &= 1, \dots, I; t = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (11)$$

Este modelo genera medidas de eficiencias relativas a la firma más eficiente en la muestra y, así, si se tiene un número pequeño de firmas, los estimadores podrían no ser confiables. Como se mencionó anteriormente, este modelo puede ser estimado con los enfoques de efectos fijos y aleatorios. El método de efectos fijos es apropiado cuando se asume que existe correlación entre las intersecciones y las regresoras, aunque debido a que utiliza variables dicótomas consume muchos grados de libertad cuando el número de empresas en la muestra es muy grande. Por otra parte, el método de efectos aleatorios es adecuado para los casos en que la intersección aleatoria de cada unidad transversal no está correlacionada con las regresoras. La estimación del modelo a través de este último enfoque se hace usando la técnica de máxima verosimilitud. Esta técnica involucra la realización de supuestos distribucionales fuertes acerca de la distribución de los u_{it} ²⁵.

2. Modelos de ineficiencia variantes en el tiempo

Dada la restricción impuesta por los modelos de ineficiencia invariantes en el tiempo, se han desarrollado modelos que permiten que la ineficiencia técnica varíe en el tiempo. Siguiendo a Coelli *et al.* (2005), estos modelos toman la forma de:

$$u_{it} = f(t) \cdot u_i \quad (12)$$

donde $f(\cdot)$ es una función que determina cómo varía la ineficiencia técnica en el tiempo. Los desarrollos más conocidos para esta función son:

Kumbhakar (1990):

$$f(t) = [1 + \exp(\alpha t + \beta t^2)]^{-1} \quad (13)$$

²⁵ Battese y Coelli (1988) consideran una distribución normal truncada, $u_i \sim iid^+ (\mu,) \delta_u^2$.

y Battese y Coelli (1992):

$$f(t) = \exp[\eta(t - T)] \quad (14)$$

Esta función, $f(t)$, satisface las siguientes propiedades: $f(t) \geq 0$ y $f(T)=1$ y es no creciente o no decreciente dependiendo del signo de η . Esta función involucra sólo la estimación de un parámetro (η).

Los modelos de ineficiencia que varían en el tiempo toman la forma de:

$$\ln q_{it} = \beta_{0t} + \sum_n \beta_n \ln x_{nit} + v_{it} - u_{it} \quad (15)$$

$$= \beta_{it} + \sum_n \beta_n \ln x_{nit} + v_{it} \quad (16)$$

Donde $\beta_{it} = \beta_{0t} - u_{it}$ es el intercepto del productor i en el período t . Esta ecuación permite obtener tanto los estimadores de los parámetros que describen la estructura de producción como los estimadores de la eficiencia para cada productor. Los modelos de Kumbhakar (1990) y Battese y Coelli (1992) son estimados en el esquema de efectos aleatorios. Esto permite descomponer los efectos de ineficiencia y el cambio tecnológico, bajo el supuesto de que u_i tiene una distribución normal truncada, usando el método de máxima verosimilitud para obtener los parámetros del modelo. En los análisis empíricos se realizaron las estimaciones tanto de los niveles de eficiencia invariantes con respecto al tiempo como de los niveles de eficiencia que varían a través del tiempo.

3. Tratamiento de las variables ambientales

El rol de las variables ambientales²⁶ es permitir una medición de la eficiencia productiva que incluya de manera explícita las diferencias en el ambiente en el que operan las empresas (Rodríguez, Rossi y Ruzzier, 1999) pues los procesos productivos se ven muchas veces influenciados por variables exógenas. En el caso del sector eléctrico, se considera que la hidrología, la topología y la densidad de la población donde

²⁶ Este término hace referencia a las variables exógenas que podrían influir en el proceso de producción. Por ejemplo, en las empresas que distribuyen energía las condiciones geográficas, el número de usuarios y su densidad de localización pueden tener un efecto en el desempeño de las empresas.

está localizada la empresa son factores exógenos que tienen un efecto en el proceso productivo de las firmas.

De acuerdo con Coelli *et al.* (2005), existen dos métodos para incorporar variables ambientales en el modelo.

El primer método consiste en incluir estas variables como componentes de la frontera de producción. Así, se supone que los factores ambientales tienen una influencia directa en el desempeño de las empresas. Con este método el modelo con datos en panel toma la forma de:

$$\ln q_{it} = x'_{it}\beta + z'_{it}\gamma + v_{it} - u_{it} \quad (17)$$

donde z_{it} es un vector de variables ambientales y γ es un vector de parámetros desconocidos.

El segundo método consiste en permitir que las variables ambientales influyeran directamente el componente estocástico de la frontera de producción. De esta manera, el término de ineficiencia es una función explícita de un vector de características ambientales, z_{it} , y la estructura del modelo sería:

$$\ln q_{it} = x'_{it}\beta + v_{it} - u_{it} \quad (18)$$

$$u_{it} \sim N^+(z'_{it}\gamma, \sigma^2) \quad (19)$$

En este estudio la estimación de la ineficiencia se llevará a cabo usando ambos métodos para el tratamiento de las variables ambientales.

E. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LAS FUNCIONES DE DISTANCIA

Como se mencionó antes, las funciones de distancia son muy útiles para describir la tecnología de producción cuando se emplean múltiples insumos para producir múltiples productos. Además, el uso de las funciones de distancia es apropiado cuando no es adecuado asumir que las firmas minimizan costos o maximizan ingresos, como es el caso de las industrias que son reguladas. Por lo tanto, estas funciones proveen la base conceptual para varias medidas de eficiencia y productividad. Cabe anotar que estas medidas de eficiencia asumen que la tecnología de producción es conocida. Sin embargo, esto no ocurre en la práctica y las funciones de distancia deben ser estimadas de manera directa.

Con información de datos en panel, la función de distancia orientada a los insumos definida sobre M productos y K insumos toma la forma de:

$$d_{it}^I = d^I(x_{1it}, x_{2it}, \dots, x_{Kit}, q_{1it}, q_{2it}, \dots, q_{Mit}) \quad (20)$$

Donde x_{Kit} es el k -ésimo insumo de la firma i en el período t , q_{Mit} es el m -ésimo producto de la firma i en el período t y $d_{it}^I \geq 1$ es la máxima cantidad por la cual el vector de insumos puede ser contraído radialmente sin cambiar el vector de productos. Las propiedades de esta función de distancia fueron discutidas en la subsección III.B.2.

Según Coelli *et al.* (2005), el primer paso para estimar una función de distancia es escoger la forma funcional para $d^I(\cdot)$. En este estudio se elige una forma funcional translogarítmica para la función de distancia. De acuerdo con Coelli y Perelman (2000), la forma funcional debería ser idealmente: i) flexible, ii) fácil de calcular y iii) permitir la imposición de homogeneidad. La forma funcional translogarítmica satisface estos requisitos.

La función de distancia translogarítmica orientada a los insumos para el caso de M productos y K insumos es especificada como:

$$\begin{aligned} \ln d_{it}^I = & \alpha_0 + \sum_{m=1}^M \alpha_m \ln q_{mit} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \alpha_{mn} \ln q_{mit} \ln q_{nit} + \sum_{k=1}^K \beta_k \ln x_{kit} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \beta_{kl} \ln x_{kit} \ln x_{lit} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \delta_{km} \ln x_{kit} \ln q_{mit} + v_{it} \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (21)$$

Donde v_{it} es una variable aleatoria que denota el ruido estadístico. Las restricciones requeridas para homogeneidad de grado 1 en insumos son:

$$\sum_{k=1}^K \beta_k = 1 \quad (22)$$

y

$$\sum_{l=1}^K \beta_{kl} = 0 \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (23)$$

y

$$\sum_{m=1}^M \delta_{km} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (24)$$

y los requerimientos para simetría son:

$$\alpha_{mn} = \alpha_{nm} \quad m, n = 1, 2, \dots, M \quad \beta_{kl} = \beta_{lk} \quad k, l = 1, 2, \dots, M \quad (25)$$

Adicionalmente, se requiere la restricción de separabilidad entre insumos y productos:

$$\delta_{km} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K, m = 1, 2, \dots, M \quad (26)$$

Siguiendo a Lovell *et al.* (1994), la restricción de homogeneidad implica que:

$$d^l(\lambda x, q) = \lambda d^l(x, q) \quad \lambda \geq 0 \quad (27)$$

Si se considera que la función de distancia es homogénea de grado uno en insumos, se impone la restricción de homogeneidad a través de la normalización de todos los insumos por uno escogido de manera arbitraria (por ejemplo el Kth insumo) y se define $\lambda = 1/x_K$, se obtiene:

$$d^l(x/x_K, q) = d^l(x, q)/x_K \quad (28)$$

Para la función translog y con las restricciones anteriores, se obtiene:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{d_{it}^l}{x_N}\right) = & \alpha_0 + \sum_m \alpha_m \ln q_m + \frac{1}{2} \sum_m \sum_n \alpha_{mn} \ln q_m \ln q_n + \sum_k^{K-1} \beta_k \ln\left(\frac{x_k}{x_K}\right) + \\ & \frac{1}{2} \sum_k^{K-1} \sum_l^{K-1} \beta_{kl} \ln\left(\frac{x_k}{x_K}\right) \ln\left(\frac{x_l}{x_K}\right) + \sum_{m=1}^M \sum_k^{K-1} \delta_{mk} \ln q_m \ln\left(\frac{x_k}{x_K}\right) + v \end{aligned} \quad (29)$$

Para obtener la ecuación anterior en una regresión estimable ésta se reescribe como:

$$\ln(d_{it}^l/x_{Kit}) = TL^{(x_{it}/x_{Kit}, q_{it}, \alpha, \beta, \delta)} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (30)$$

o

$$\ln(d_{it}^I) - \ln(x_{Kit}) = TL(x_{it}/x_{Kit}, q_{it}, \alpha, \beta, \delta) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (31)$$

y así,

$$-\ln(x_{Kit}) = TL(x_{it}/x_{Kit}, q_{it}, \alpha, \beta, \delta) - \ln(d_{it}^I) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (32)$$

Donde $\ln(d_{it}^I) = u_{it}$, es decir, el logaritmo natural de la función de distancia, es una variable no negativa asociada con la ineficiencia técnica. Entonces, el término $-\ln(d_{it}^I)$ se puede interpretar como el error que explica la diferencia entre los puntos de los datos observados y aquellos puntos que predice la función translog de distancia estimada (Melo y Espinosa, 2004). Siguiendo a Coelli *et al.* (2005), la decisión de expresar $\ln(d_{it}^I)$ como una función lineal de insumos y productos da como resultado un modelo que toma la forma del modelo de frontera de producción estocástica.

IV. ESPECIFICACIÓN DE MODELOS PARA LA DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD EN COLOMBIA

A. ESTUDIOS PREVIOS

En esta sección se describen las especificaciones empíricas de algunos modelos presentados en la literatura y se revisan algunos estudios previos que explican la elección de los insumos, los productos y las variables ambientales incluidas en este análisis. Los estudios que se presentan han sido aplicados al sector de distribución de energía eléctrica de Europa, América Latina y Colombia.

Los siguientes estudios consideran funciones de costos cuya variable dependiente es el costo de distribución de electricidad y se diferencian en las variables explicativas que utiliza la función.

Neuberg (1977) sugiere cuatro variables explicativas: número de clientes servidos, total de kW/h vendidos, km de líneas de distribución y km² de área de distribución. Además, señala que la definición de multiproducto implica que la firma puede determinar cantidades y precios para cada uno de los productos de forma independiente y, por lo tanto, descarta la posibilidad de tratar a las empresas del sector como multiproductoras.

Burns y Weyman-Jones (1996) agregan algunas variables explicativas adicionales como la máxima demanda, que determina la capacidad total del sistema; la dispersión de los usuarios a través de la región de distribución, que determina la configuración del sistema; la capacidad de transformación, que tiene un efecto sobre las pérdidas de la red; y la estructura de la demanda, que determina las diferentes capacidades a las que deben operar las líneas a diferentes horas. Pollit (1995) considera como variables explicativas las ventas por cliente, la relación entre la demanda máxima y la demanda promedio, el número de clientes, la proporción de las ventas residenciales y las ventas totales, los km de redes aéreas por cliente, los km de redes subterráneas por cliente, la capacidad de transformación por cliente, el área de servicio en km², el costo salarial de los empleados y variables *dummy* que indican si la empresa es de propiedad pública o privada; además, incluye otra variable *dummy* que sirve para realizar comparaciones internacionales que adopta el valor de 1 si es del Reino Unido y de 0 en los demás casos.

Huettner y Landon (1977) tienen como variables explicativas la capacidad total por kW/h, la demanda promedio en relación con la capacidad máxima, el número de líneas de transformación por cliente, las ventas residenciales por cliente, las ventas comerciales por cliente, las ventas industriales por cliente, el costo salarial de la firma, variables *dummy* geográficas y variables *dummy* de propiedad.

A pesar de los diversos estudios realizados existe poco consenso al precisar el producto en las empresas que prestan el servicio de distribución de energía. Aunque una sola variable puede ser escogida para representar el producto, como el total de electricidad suministrada o el número de clientes, muchos estudios han considerado que es mejor tener múltiples productos para la tecnología de los servicios de distribución de electricidad. Weyman-Jones (1992) utilizan el DEA para medir la eficiencia técnica en una muestra de doce empresas eléctricas del Reino Unido en el período 1970-1 a 1988-9. En este estudio presentan dos modelos. El primer modelo tiene múltiples productos como ventas residenciales (kWh), ventas comerciales (kWh), ventas industriales (kWh) y demanda máxima (kW) y múltiples insumos como el número de empleados, el tamaño de la red (km) y la capacidad de transformación (MVA); en el segundo modelo sólo se considera como producto el número de clientes y como insumo el número de empleados y, ya que existe un consenso sobre que en este sector se hace difícil distinguir entre insumos y variables exógenas que influyen el servicio de distribución de electricidad, los autores consideran como variables ambientales el tamaño de la red (km), la capacidad de transformación

(MVA), las ventas totales (kWh), la demanda máxima (kW), la densidad de la población y las ventas industriales/ventas totales (%).

Por otra parte, Hjalmarsson y Veiderpass (1992) estiman un modelo para examinar la eficiencia productiva en la distribución eléctrica en Suecia para el año 1985. En su modelo consideran como productos la energía vendida de alta tensión (MWh), la energía vendida de baja tensión (MWh), el número de clientes de alta tensión y el número de clientes de baja tensión; además, consideran como insumos el trabajo (horas), las líneas de alta tensión (km), las líneas de baja tensión (km) y la capacidad de transformación (kVA).

Rodríguez-Pardina, Rossi y Ruzzier (1999) realizaron una comparación internacional de la eficiencia relativa de las empresas del sector de distribución de energía eléctrica. Usaron un modelo con único producto para estimar la eficiencia en el sector de distribución de energía eléctrica en Sudamérica. En su modelo final el producto es el número de clientes y como variables explicativas tienen los siguientes insumos y variables ambientales: número de empleados, ventas totales (MWh), estructura del mercado (%) y capacidad de transformación (kVA).

Hattori (2002) estima y compara la eficiencia técnica de las empresas distribuidoras de energía eléctrica de Estados Unidos y Japón. En sus modelos usa como productos las ventas residenciales (GWh) y las ventas no residenciales (GWh) y como insumos el trabajo y el capital (MVA). Además, incluye variables ambientales como el factor de carga, la densidad de los consumidores, el consumo por consumidor y la razón de ventas no residenciales. Los modelos planteados por Hattori se diferencian en la inclusión de las variables ambientales que tienen un efecto sobre la tecnología de producción o el término de ineficiencia.

En Colombia, Melo y Espinosa (2004) estimaron la ineficiencia en la distribución de energía eléctrica con una aplicación de las funciones de distancia estocástica orientada al producto. En este estudio consideraron como productos las ventas (GWh) realizadas por las empresas a diferentes tipos de usuarios (residencial, comercial e industrial y otros sectores) ya que los voltajes de distribución y cantidades de consumos por usuario difieren y tienen un efecto sobre la tecnología de producción. Como regresores consideran la cantidad de los insumos trabajo y el capital empleados por las empresas. Además, los autores plantean varios modelos que se diferencian entre sí por la inclusión de las variables ambientales que influyen en la tecnología de producción o el término de ineficiencia y por la consideración de efectos de ineficiencia variantes o

invariantes en el tiempo. El estudio concluye que existen diferencias significativas en el desempeño de las empresas y observa que las empresas públicas registran un mejor desempeño cuando las variables ambientales influyen de manera directa en la eficiencia y no en la función de producción.

B. ESPECIFICACIÓN Y DATOS

Se especifica una función de distancia orientada a los insumos ya que las firmas que distribuyen energía tiene mayor control sobre los insumos que sobre el producto a ofertar; por lo genera, estas compañías tienen establecidas zonas geográficas donde prestan sus servicios.

Tal como se mencionó en la sección III.D, al imponer la restricción de homogeneidad de grado uno en los insumos²⁷ y de simetría se permite a las funciones de distancia ser modelos de regresión estimables (ecuaciones 25–28).

Siguiendo a Hattori (2002) se estima una función de distancia orientada a los insumos que incluye variables ambientales en la tecnología de producción y en la tendencia del tiempo para capturar el cambio tecnológico. La función de distancia estocástica orientada a los insumos se representa como:

$$1 = d_I(x, q, t; z) \exp(v - u) \quad (33)$$

Donde x y q son el vector de insumos y de productos respectivamente, t es la tendencia del tiempo y z es un vector de variables ambientales²⁸; además, siguiendo el modelo teórico, $v_{it} \sim iidN(0, \sigma_v^2)$ y $u_{it} \sim iidN^+(\mu, \sigma_u^2)$. Bajo los supuestos anteriores, la función de verosimilitud puede ser definida y los parámetros de la tecnología y la varianza de la ineficiencia pueden ser estimados mediante el método de máxima verosimilitud.

²⁷ En particular, se cumple la propiedad de monotonicidad débil: $D_I(y, \lambda x) = \lambda D_I(y, x)$ para $\lambda \geq 1$ (Kumbhakar y Lovell, 2000). Para un tratamiento detallado de estas propiedades y la demostración consúltese Färe y Primont (1995).

²⁸ Como se mencionó antes, las variables ambientales se pueden incluir de manera directa explicando la variación de la media de la ineficiencia. Este modelo fue desarrollado por Battese y Coelli (1995).

Al imponer las restricciones de homogeneidad de grado uno en los insumos y de simetría en la ecuación 33 normalizada y después de elegir de manera arbitraria un insumo, se obtiene la siguiente función estimable:

$$1/x_N = d_I(q, x/x_N, t; z) \exp(v - u) \quad (34)$$

En este trabajo se utiliza la forma funcional translog gracias a sus propiedades (véase sección III.D).

Con un cambio tecnológico no neutral y con variables ambientales como argumento de la tecnología de producción, la especificación es la siguiente:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{1}{x_N}\right) = & \beta_0 + \sum_m^M \beta_m \ln q_m + \frac{1}{2} \sum_m^M \sum_n^N \beta_{mn} \ln q_m \ln q_n + \sum_k^{K-1} \alpha_k \ln\left(\frac{x_k}{x_K}\right) + \\ & \frac{1}{2} \sum_k^{K-1} \sum_l^{K-1} \alpha_{kl} \ln\left(\frac{x_k}{x_K}\right) \ln\left(\frac{x_l}{x_K}\right) + \sum_m^M \sum_k^{K-1} \gamma_{mk} \ln q_m \ln\left(\frac{x_k}{x_K}\right) + \delta_t t + \end{aligned} \quad (35)$$

$$\sum_m^M \beta_{mt} \ln q_m t + \sum_k^{K-1} \alpha_{kt} \ln\left(\frac{x_k}{x_K}\right) t + \frac{1}{2} \beta_{tt} t^2 + \sum_s^S \theta_s \ln z_s - u + v$$

$$\ln\left(\frac{1}{x_N}\right) = TL + \sum_s^S \theta_s \ln z_s - u + v \quad (36)$$

Donde M es el número de productos, K es el número de insumos y S es el número de variables ambientales²⁹.

Además, de acuerdo con Coelli *et al.* (2005), cada una de las variables se normaliza por su media a priori a la estimación. Estas funciones de distancia son estimadas por máxima verosimilitud usando FRONTIER versión 4.1 y Stata versión 10. FRONTIER calcula las estimaciones de la varianza mediante la reparametrización, $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ y $\gamma = \sigma_u^2 / \sigma^2$. El coeficiente γ indica la proporción del término de error compuesto que corresponde al componente de ineficiencia.

²⁹ Los requerimientos de simetría están dados por $\beta_{mn} = \beta_{nm}$, $\alpha_{kl} = \alpha_{lk}$, $\gamma_{mk} = \gamma_{km}$.

Se aplica este modelo para evaluar el desempeño del sector de distribución de energía eléctrica en Colombia. La serie involucra datos anuales de veinticuatro compañías durante cuatro años, es decir, comprende el período tarifario 2004-2007³⁰. Estos datos fueron obtenidos de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD)³¹. El número total de observaciones es 96.

Las variables utilizadas para la medición del producto son las ventas totales al sector residencial en kW/h y las ventas totales al sector no residencial en kW/h.

Los insumos para la distribución de electricidad son el trabajo y el capital. El número total de empleados mide la cantidad de trabajo en cada empresa. Siguiendo a Melo y Espinosa (2004), esta variable se incluye en forma agregada y se supone una distribución uniforme del grado de calificación de los empleados de las empresas debido a la disponibilidad de la información y a las limitaciones de grados de libertad. Por otra parte, se considera que los principales insumos de capital para la distribución de energía son la capacidad de los transformadores medida en kW y la longitud de las líneas de distribución medida en kilómetros. Se consideran estos insumos porque para distribuir la energía eléctrica ésta debe ser transformada primero en bloques menores de energía para luego ser distribuida a través de redes hasta llegar al consumidor final (Sandoval, 2004).

Las variables ambientales que influyen en la tecnología de la distribución de electricidad o la ineficiencia son la densidad del consumo, definida como las ventas de electricidad por consumidor, y la densidad de los clientes³². Esta última variable se mide por la relación entre el número de clientes y el número de transformadores; de esta manera se intenta capturar una medida de la cantidad de capital necesario por cliente.

30 En principio se había considerado el período 2003-2007, pero debido a las limitaciones de disponibilidad de información sobre la variable número de empleados en el SUI se excluyó el año 2003. En consecuencia, el estudio comprende el período 2004-2007.

31 El Apéndice 1 presenta la lista de empresas sobre las cuales se tiene la información pertinente.

32 Hattori (2002) usa estas variables ambientales en su estudio de eficiencia comparativo del sector de distribución eléctrica entre Japón y Estados Unidos.

Cuadro 2 Estadística Descriptiva

Variable	Media	Desviación	
Ventas Totales Residenciales (KWH)	624.080.122	944691751.88	
Ventas Totales No Residenciales (KWH)	405.843.167	770353788.79	
Número de Empleados	571	552	
Capacidad Instalada (KVA)	951.429	1439234.68	
Longitud de la Red (KM)	5.596	5290.59	
Densidad de los Consumidores	30.2	35.98	
Densidad del Consumo	3.365.805	23053046.	
Número de Períodos			4
Número de Empresas			24
Número de Observaciones			96

Fuente: Cálculos propios.

En general, se pretende estimar la eficiencia técnica de las empresas y conocer si el sector ha generado cambio tecnológico, es decir, comprobar si ha existido durante el período de estudio un desplazamiento de la frontera de producción³³ y verificar si las empresas han mejorado sus niveles de eficiencia técnica a través del tiempo³⁴. En otras palabras, se intenta comprobar si las empresas ineficientes han efectuado un acercamiento a la frontera (*catch-up*). En los modelos presentados se estiman funciones de distancia orientadas a los insumos y se considera que el término de eficiencia tiene una distribución normal truncada, tal como se especifico antes. Se elige esta distribución en lugar de una media normal considerando que en todos los modelos estimados en este estudio el parámetro μ es positivo y significativo. Además, como lo afirman Melo y Espinosa (2004), ésta es la distribución empleada en los modelos para permitir la variación del término de eficiencia en el tiempo (Battese y Coelli, 1992).

Modelo 1: no incluye la variable de tendencia temporal ni las variables ambientales en la estimación de la tecnología de producción y supone que la ineficiencia es invariante en el tiempo.

³³ Tendencia temporal.

³⁴ Es decir, dinámica de la eficiencia variante o invariante en el tiempo.

Modelo 2: incluye variables ambientales como argumento de la tecnología de producción, no incluye la variable de tendencia temporal y supone que la ineficiencia es invariante en el tiempo.

Modelo 3: incluye variables ambientales como argumento de la tecnología de producción, no incluye la variable de tendencia temporal y supone que la eficiencia varía en el tiempo³⁵.

Modelo 4: incluye variables ambientales como argumento de la tecnología de producción y la variable de tendencia temporal, supone que la ineficiencia es invariante en el tiempo.

Modelo 5: incluye variables ambientales como argumento del término de ineficiencia y supone que la eficiencia es invariante en el tiempo³⁶.

Los modelos a estimar contienen las siguientes variables:

Cuadro 3
Variables

Insumos	Productos	Variables Ambientales
1. Número de empleados (x1)	1. Ventas Totales a Clientes Residenciales en KW/h (Y1)	1. Densidad de los clientes (Z1). Relación: <i>Consumidores/Transformadores</i>
2. Capacidad de Transformación en kVA (x2)	2. Ventas Totales a Clientes No Residenciales en KW/h (Y2)	2. Densidad del consumo (Z2). Relación: <i>Consumo/Clientes</i>
3. Kilómetros de la red en km (x3)		

Fuente: Cálculos propios

³⁵ Se sigue el modelo de Battese y Coelli, 1992.

³⁶ Este modelo se especifica siguiendo a Battese y Coelli (1995).

y las siguientes especificaciones;

Modelo 1:

$$\begin{aligned}
 -\ln x_3 = & \beta_0 + \sum_{m=1}^2 \beta_m \ln q_m + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \beta_{mn} \ln q_m \ln q_n \\
 & + \sum_{k=1}^2 \alpha_k \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \alpha_{kl} \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) \ln \left(\frac{x_l}{x_3} \right) \\
 & + \sum_{m=1}^2 \sum_{l=1}^2 \gamma_{mk} \ln q_m \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) - u + v
 \end{aligned} \tag{37}$$

Modelo 2:

$$\begin{aligned}
 -\ln x_3 = & \beta_0 + \sum_{m=1}^2 \beta_m \ln q_m + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \beta_{mn} \ln q_m \ln q_n \\
 & + \sum_{k=1}^2 \alpha_k \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \alpha_{kl} \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) \ln \left(\frac{x_l}{x_3} \right) \\
 & + \sum_{m=1}^2 \sum_{l=1}^2 \gamma_{mk} \ln q_m \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \sum_{s=1}^2 \theta_s z_s - u + v
 \end{aligned} \tag{38}$$

Modelo 3:

$$\begin{aligned}
 -\ln x_3 = & \beta_0 + \sum_{m=1}^2 \beta_m \ln q_m + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \beta_{mn} \ln q_m \ln q_n \\
 & + \sum_{k=1}^2 \alpha_k \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \alpha_{kl} \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) \ln \left(\frac{x_l}{x_3} \right) \\
 & + \sum_{m=1}^2 \sum_{l=1}^2 \gamma_{mk} \ln q_m \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \sum_{s=1}^2 \theta_s z_s - u + v
 \end{aligned} \tag{39}$$

Modelo 4:

$$\begin{aligned}
 -\ln x_3 = & \beta_0 + \sum_{m=1}^2 \beta_m \ln q_m + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \beta_{mn} \ln q_m \ln q_n \\
 & + \sum_{k=1}^2 \alpha_k \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \alpha_{kl} \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) \ln \left(\frac{x_l}{x_3} \right) \\
 & + \sum_{m=1}^2 \sum_{l=1}^2 \gamma_{mk} \ln q_m \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \delta_t + \sum_{m=1}^2 \beta_m \ln q_m t \\
 & + \sum_{k=1}^2 \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) t + \frac{1}{2} \beta_{tt} t^2 + \sum_{s=1}^2 \theta_s z_s - u + v
 \end{aligned} \tag{40}$$

Modelo 5:

$$\begin{aligned}
 -\ln x_3 = & \beta_0 + \sum_{m=1}^2 \beta_m \ln q_m + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \beta_{mn} \ln q_m \ln q_n \\
 & + \sum_{k=1}^2 \alpha_k \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 \alpha_{kl} \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) \ln \left(\frac{x_l}{x_3} \right) \\
 & + \sum_{m=1}^2 \sum_{l=1}^2 \gamma_{mk} \ln q_m \ln \left(\frac{x_k}{x_3} \right) + -u + v \\
 \\
 u & \sim iN(m_t, \sigma_u^2) \\
 m_t & = \sum_{s=1}^2 \theta_s z_s
 \end{aligned} \tag{41}$$

V. RESULTADOS EMPÍRICOS

Los cuadros 4 y 5 se muestran los resultados de las estimaciones de la función de distancia orientada a los insumos. Dado que las variables están expresadas en logaritmos y reescaladas en unidades a sus medias, los coeficientes de primer orden pueden ser interpretados como elasticidades (Coelli, *et al.* 2005). Dado que se ha homogenizado usando un insumo, se espera que los coeficientes de los productos tengan signos negativos pues un aumento en la producción —con un nivel constante de insumos empleados— reduce la distancia que observa la empresa analizada con

respecto a la frontera eficiente. Por el contrario, se esperan signos positivos para los insumos pues a medida que la empresa aumenta el nivel de insumos aumenta la distancia observada con respecto a la frontera. Se espera que los coeficientes de segundo orden y los términos cruzados sean positivos.

En cuanto a los coeficientes de las variables ambientales, se espera que sean positivos para los modelos 2, 3 y 4 pues los aumentos en las densidades de los clientes y del consumo lideran una tecnología de producción favorable y una reducción de la ineficiencia. En otras palabras, aquellas empresas con una mayor cantidad de clientes por transformador emplean una relación menor de insumos por cliente. Asimismo, niveles altos de consumo por usuario implican menos insumos para atender el mismo número de clientes. Finalmente, atender los sectores no residenciales implica usar menos transformadores. De igual manera, se espera que los signos de los coeficientes de las variables ambientales para el modelo 5 sean negativos. En este modelo las variables ambientales son consideradas como variables explicativas de la ineficiencia y, en este sentido, si las variables ambientales son favorables un incremento de éstas reduce la ineficiencia.

En la estimación, el término γ relaciona qué tanto de la variación del error compuesto se debe al componente de ineficiencia técnica. Por otra parte, el signo del parámetro η indicará si la eficiencia técnica mejora. Finalmente, como ya se señaló, el modelo 4 incluye una tendencia temporal; los estimadores de esta variable indicarán si hubo cambio tecnológico en el período de estudio.

Como se observa en los cuadros 4 y 5, los productos y los insumos tienen los signos esperados en todos los modelos estimados. En cuanto a la significatividad de los coeficientes, los productos y los insumos considerados resultaron ser significativos, con excepción del producto ventas al sector no residencial que en el modelo 1 fue no significativo. Es interesante resaltar que la elasticidad del insumo dos (capacidad de los transformadores) con respecto a los productos es alta, en comparación con el insumo uno (trabajo). Esto sugiere que la capacidad de los transformadores es un insumo relevante en la distribución de energía y un componente importante en la determinación de la eficiencia.

En relación con las variables ambientales, las densidades de clientes y de consumo tienen signos negativos y presentan significancia estadística en los modelos estimados. Esto implica que las variables ambientales, incluidas en el componente determinístico del modelo, son explicativas de la producción de las empresas. Es decir, existe un en-

torno que tiene un efecto positivo y que demuestra que las empresas distribuidoras de energía se benefician de los entornos en los que hay una mayor proporción de consumo por transformador y una mayor proporción de consumo por clientes.

El término γ^{37} estimado es alto (en promedio 0,95). Esto significa que gran parte de la variación en el término de error compuesto se debe al componente de ineficiencia. En otras palabras, de los dos componentes de error que hay en el modelo —el componente de error que explica el ruido estadístico y componente de error que explica la ineficiencia— el de ineficiencia presenta una mayor participación. Esto sugiere que si el componente de error compuesto está explicado en gran medida por la ineficiencia de las empresas, los análisis de frontera estocástica ofrecerán estimaciones tan buenas como aquellas realizadas a través de DEA.

El modelo 3, a diferencia de los otros, incorpora un análisis de eficiencia variante en el tiempo a través del parámetro η . La estimación tiene signo positivo. Esto sugiere que la eficiencia técnica ha mejorado. Sin embargo, este efecto no tiene significancia estadística. De lo anterior podemos derivar, entonces, que no hay evidencia para decir que las empresas han tenido cambios significativos en la eficiencia durante el período de estudio. El modelo 4 se estima considerando una tendencia temporal para de verificar la existencia de cambio tecnológico. El signo positivo del parámetro sugiere desplazamientos de la frontera de producción; sin embargo, no presenta significancia estadística. Lo anterior implica que para el período 2004-2007 el sector de distribución de energía eléctrica no ha experimentado cambio tecnológico (desplazamiento de la frontera) ni mejoras en los niveles de ineficiencia técnica (acercamientos a la frontera por parte de las empresas ineficientes). Debemos señalar, sin embargo, que el período de estudio es muy corto para estimar cambio tecnológico en el tiempo.

³⁷ $\gamma = \sigma_u^2 / \sigma_v^2$.

Cuadro 4 Estimación Función de Distancia

	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
		P>Z		P>Z		P>Z
Constante	0.97	0.000	1.00	0.000	0.99	0.000
Ln q1	-1.07	0.000	-1.04	0.000	-1.04	0.000
Lnq2	-0.02	0.399	-0.065	0.053	-0.068	0.044
Ln(X1/X3)	0.22	0.005	0.230	0.003	0.24	0.002
Ln(X2/X3)	0.666	0.000	0.704	0.000	0.706	0.000
(Lnq1) ² /2	-0.093	0.000	-0.09	0.000	-0.089	0.000
Lnq1*Lnq2	-0.00085	0.924	-0.0048	0.604	-0.0035	0.694
(Lnq2) ² /2	-0.0013	0.696	0.0042	0.258	0.0045	0.223
(Ln(X1/X3)) ² /2	0.091	0.000	0.106	0.000	0.103	0.000
Ln(X1/X3)Ln(X2/X3)	-0.1	0.000	-0.0999	0.000	-0.093	0.001
Ln(X2/X3) ² /2	-0.0981	0.183	-0.140	0.063	-0.12	0.11
Ln(X1/X3)Lnq1	-0.06	0.000	-0.0605	0.000	-0.06	0.000
Ln(X1/X3)Lnq2	-0.0062	0.272	-0.01	0.124	-0.007	0.188
Ln(X2/X3)Lnq1	0.063	0.000	0.061	0.000	0.06	0.000
Ln(X2/X3)Lnq2	0.016	0.12	0.042	0.007	0.039	0.009
LnZ1			0.046	0.022	0.042	0.021
LnZ2			0.093	0.065	0.097	0.059
Sigma cuadrado	0.157	0.000	0.130	0.000	0.11	0.000
Gamma	0.951	0.000	0.946	0.000	0.93	0.000
mu	0.490	0.003	0.5	0.001	0.48	0.000
Eta	Restringido a cero		Restringido a cero		0.012	0.372
Log likelihood Funtion	50.4		53.6		54.35	

Fuente: Cálculos propios

Cuadro 5
Estimación de Función de Distancia

	Modelo 4		Modelo 5	
	Coeficiente	P>Z	Coeficiente	P>Z
Constante	1.02	0.000	1.2	0.000
$\ln q_1$	-0.8	0.000	0.87	0.000
$\ln q_2$	-0.29	0.035	-0.16	0.03
$\ln(X_1/X_3)$	0.25	0.001	0.49	0.000
$\ln(X_2/X_3)$	0.68	0.000	0.63	0.000
$(\ln q_1)^{2/2}$	-0.069	0.000	-0.085	0.000
$\ln q_1 * \ln q_2$	-0.017	0.961	0.025	0.011
$(\ln q_2)^{2/2}$	0.014	0.245	-0.012	0.11
$(\ln(X_1/X_3))^{2/2}$	0.109	0.000	0.15	0.000
$\ln(X_1/X_3) \ln(X_2/X_3)$	-0.102	0.000	-0.078	0.02
$\ln(X_2/X_3)^{2/2}$	-0.139	0.102	-0.046	0.43
$\ln(X_1/X_3) \ln q_1$	-0.049	0.000	-0.015	0.48
$\ln(X_1/X_3) \ln q_2$	-0.0095	0.213	0.01	0.34
$\ln(X_2/X_3) \ln q_1$	0.0499	0.000	0.0037	0.86
$\ln(X_2/X_3) \ln q_2$	0.0426	0.027	0.019	0.40
Constante			0.43	0.000
$\ln Z_1$	0.045	0.03	-0.074	0.01
$\ln Z_2$	0.144	0.023	-0.58	0.000
t	0.037	0.148		
$\ln q_1 * t$	0.00292	0.43		
$\ln q_2 * t$	0.00008	0.983		
$\ln(X_1/X_3) * t$	0.019	0.15		
$\ln(X_2/X_3) * t$	-0.0043	0.68		
$0,5t^2$	-0.0450	0.027		
σ^2	0.12	0.000	0.059	0.000
γ	0.94	0.000	0.99	0.000
μ	0.45	0.001		
η	Restringido a cero			
Log likelihood Function	59.5			

Fuente: Cálculos propios

El Cuadro 6 presenta la eficiencia técnica promedio estimada con la especificación de cada uno de los modelos. Como se puede observar, en el primer modelo —que no incluye las variables ambientales y en el cual no se considera el cambio tecnológico ni la eficiencia variando en el tiempo— la eficiencia promedio es 59,73 %. En los modelos 2 y 3 —en los cuales se incluyen las variables ambientales— la eficiencia técnica es 60,12 % y 60,5 % respectivamente. Esto evidencia un impacto muy bajo de dichas variables en la tecnología de producción. Sin embargo, cuando se estima el modelo 4 —que incluye el término de la tendencia temporal y las variables ambientales pero se mantiene la ineficiencia invariante en el tiempo— la eficiencia técnica promedio se incrementa a 62 %. Esto indica que la variable temporal tiene un efecto positivo sobre la eficiencia técnica. El modelo 5 incorpora las variables ambientales de manera directa en el componente estocástico de la frontera de producción³⁸ para relacionar las ineficiencias directamente con las variables ambientales. En este modelo la ineficiencia disminuye al 57,09 %, lo cual sugiere que el desempeño administrativo de las empresas está influenciado por el entorno en el cual opera.

Cuadro 6
Eficiencia Técnica Promedio de la Industria

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Mínimo	30.96%	32.41%	32.34%	34.07%	28.00%
Máximo	94.15%	93.74%	94.32%	94.13%	99.00%
Media	59.73%	60.12%	60.5%	62.38%	57.09%
Desviación Estandar	0.18	0.18	0.182	0.18	0.19

Fuente: Cálculos propios

El resultado promedio de los diferentes modelos arroja una eficiencia técnica de 60 %. Esto revela que las empresas distribuidoras de energía tienen mucho por hacer en términos de eficiencia.

³⁸ Battese y Coelli (1993, 1995) presentan este modelo para el caso de datos en panel.

Para determinar cuál de los modelos es el más adecuado, se realizó la prueba de razón de verosimilitud (Cuadro 7). La prueba arroja que las variables ambientales influyen en la producción, que no se rechaza la hipótesis nula de que la eficiencia es invariante en el tiempo y que no se generó cambio tecnológico en el período de estudio en este sector. Por lo tanto, el modelo 2 es el preferido. La prueba de razón de verosimilitud no se aplicó al modelo 5 ya que no es posible relacionar este modelo con los otros cuatro. En particular, este modelo es el único que considera a las variables ambientales como argumento del término de ineficiencia.

Cuadro 7

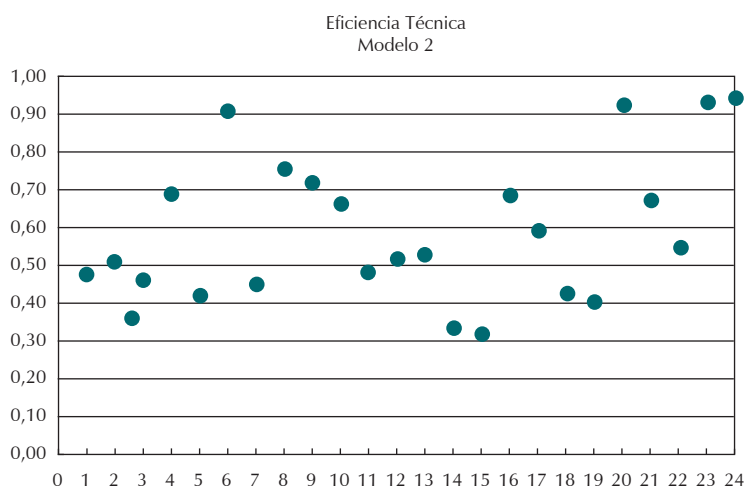
Prueba de Razón de Verosimilitud

	Restricciones	Test Estadístico	Valor c2	H_0	Decisión
Modelo 1,2	3	8,06	7,81	Variables ambientales no afectan la producción	Rechazar H_0
Modelo 2,3	1	0,64	3,84	La eficiencia es invariante en el tiempo	No se Rechaza H_0
Modelo 2,4	6	10,22	12,59	No se genera cambio tecnológico	No se Rechaza H_0

Fuente: Cálculos propios

Que el modelo 2 sea el preferido de acuerdo con la prueba de razón de verosimilitud implica que las variables ambientales, incluidas en el componente determinístico del modelo, son explicativas de la producción de las empresas. Es decir, existe un entorno que tiene un efecto positivo y que demuestra que las empresas distribuidoras de energía se benefician de los entornos en los cuales hay una mayor proporción de consumo por transformador y una mayor proporción de consumo por clientes. Los resultados que arroja este modelo indican que el 16,6 % de las empresas analizadas alcanzan una eficiencia técnica superior al 90 %. Así mismo, 45,8 % de las empresas tienen una eficiencia técnica por debajo de la media. En la figura 8 se ilustra la eficiencia técnica que se obtuvo a través de este modelo.

Gráfico 8
Eficiencia técnica



Finalmente, en el modelo 5 la eficiencia técnica promedio es 57,09 %, es decir, un valor menor en relación con las medidas de eficiencia obtenidas con el modelo 2, en el cual se consideran las variables ambientales como argumento de la tecnología de producción. Esto evidencia una vez más que el desempeño administrativo de las empresas se ve influenciado por el entorno en el cual éstas operan.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Antes de presentar las principales conclusiones y recomendaciones es necesario resaltar que existieron dificultades en la consecución de los datos pues algunas de las variables utilizadas en la estimación —por ejemplo, la longitud de las redes o la capacidad de los transformadores— no están disponibles al público en las bases de datos contenidas en las páginas web de la Superintendencia de Servicios Públicos o de la CREG. Adicionalmente, algunos operadores de red no reportan para todos los años variables como el número de empleados y esto impidió incorporar el año 2003 en el período de análisis de esta investigación.

Al considerar los cuatro primeros modelos con el test de razón de verosimilitud, se obtiene que el modelo más adecuado para la estimación es el modelo 2. Éste incluye las variables ambientales como argumento de la tecnología de producción, considera la ineficiencia invariante en el tiempo y no incluye como regresor la tendencia temporal. Lo anterior es consistente con las estimaciones de los demás modelos, los cuales mostraron que las variables ambientales determinan la tecnología de producción.

Al comparar los resultados de la eficiencia técnica obtenida del modelo 5 con los resultados del modelo 2 se evidencia que las variables ambientales influyen en gran medida el desempeño de las empresas ya que cuando se incluyen con un efecto sobre el componente de ineficiencia, la eficiencia técnica disminuye para el 58 % de las empresas. Esto sugiere que el desempeño de las empresas está influenciado por el entorno en el cual operan.

El análisis muestra que para el período 2004-2007 no se generó cambio tecnológico, es decir, no hubo un desplazamiento de la frontera de producción en el sector. Tampoco se mejoraron los niveles de eficiencia técnica, lo que significa que las empresas ineficientes no se acercaron a la frontera. Este resultado es preocupante porque la ineficiencia del sector tiene un efecto negativo sobre el bienestar de los usuarios, quienes deben pagar la ineficiencia asumiendo tarifas más altas pues en la estructura tarifaria el componente que remunera la actividad de distribución de energía eléctrica representa el 46 %.

La estimación muestra asimismo que, el término de error compuesto evidencia que un 94.5% de la variación en el término se debe al componente de ineficiencia. Esto sugiere que el error se debe en gran medida a ineficiencias del sector y no a efectos aleatorios de ruido estadístico relacionados con problemas de muestreo, mala especificación del modelo o errores de medida. Este aspecto resalta la importancia de adelantar investigaciones de eficiencia con modelos comparativos que incluyan o no componentes estocásticos, por ejemplo, comparar mediciones de eficiencia a través del análisis de envolvente de datos (DEA) y SFA.

Se obtuvo, a través de los resultados empíricos, que la eficiencia técnica es 60,12 %. Esto indica que las empresas distribuidoras de energía tienen mucho por hacer en términos de eficiencia. Sin embargo, vale la pena resaltar que el 16,6 % de las empresas analizadas alcanzan una eficiencia técnica superior al 90 %. Así mismo, 45,8 % de las empresas tienen una eficiencia técnica por debajo de la media.

Para lograr que estas empresas aumenten el nivel de producto y de cobertura y beneficiar a los grupos más pobres de la población, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) debería realizar esfuerzos aún mayores para exigir e incentivar, a través de la regulación por precio máximo o de cualquier otro mecanismo de regulación por incentivos, que las empresas que están en la frontera logren una mejora anual en la productividad, es decir, que desplacen la frontera, y que las empresas ineficientes logren mejorar la eficiencia técnica (*catch-up*). Así, la entidad reguladora estaría cumpliendo con su principal objetivo: promover la eficiencia entre los operadores.

REFERENCIAS

1. Aigner, D.; Lovell, C.; Schmidt, P. "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models", *Journal of Econometrics*, vol. 6, no. 1, Elsevier, pp. 21-37, 1977.
2. Battese, G. E.; Coelli, T. J. "Frontier Production Functions, Technical Efficiency, and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India", in T. R. Gullledge y C. A. K. Lovell (eds.), *International Applications of Productivity and Efficiency Analysis*, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1992.
3. Battese, G.; Coelli, T. "A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data", *Empirical Economics*, vol. 20, no. 2, Springer, pp. 325-332, 1995.
4. Battese, G.; Coelli, T. "Frontier Production Functions, Technical Efficiency and Panel Data: With Application to Paddy Farmers in India", *Journal of Productivity Analysis*, vol. 3, no. 1-2, Springer, pp. 153-169, 1992.
5. Battese, G.; Coelli, T. "Prediction of firm level technical inefficiencies with a generalised frontier production function and panel data", *Journal of Econometrics*, no. 38, pp. 387-399, 1988.
6. Burns, P.; Weyman-Jones, T. "Cost Functions and Cost Efficiency in Electricity Distribution: A Stochastic Frontier Approach", *Bulletin of Economic Research*, vol. 48, no.1, Blackwell Publishing, 1996.
7. Chong, A.; Lora, E. "¿Valieron la pena las privatizaciones?", *Nueva Sociedad*, no. 207, Fundación Friedrich Ebert, pp. 80-92, 2007.
8. Coelli, T. J. "A Guide to FRONTIER Version 4.1: A Computer Program for Frontier Production Function Estimation", documento de trabajo, no. 96/07, CEPA Working Paper, University of New England, 1996.
9. Coelli, T. J.; Perelman, S. "Efficiency Measurement, Multiple-output Technologies and Distance Functions: With Application to European Railways", documento de análisis, no. 96/05, CREPP Discussion Paper, Université de Liège, 1996.
10. Coelli, T. J.; Perelman, S. "A Comparison of Parametric and Nonparametric Distance Functions: With Application to European Railways", *European Journal of Operations Research*, vol. 117, no. 2, Elsevier, pp. 326-39, 1999.
11. Coelli, T.; Perelman, S.; Romano E. Accounting for Environmental Influences in Stochastic Frontier Models: With Application to International Airlines, *Journal of Productivity Analysis*, vol. 11, no. 3, Springer, pp. 251-273, 1999.
12. Coelli, T.; Perelman, S. "Technical Efficiency of European Railways: A Distance Function Approach", *Applied Economics*, vol. 32, no. 15, Taylor and Francis Journals, pp. 1967-1976, 2000.
13. Coelli, T. *et al. A Primer on Efficiency Measurement for Utilities and Transport Regulators*, Bogotá, Alfaomega Colombiana, 2003.
14. Coelli, T. J. *et al. An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*, segunda edición, Nueva York, Springer, 2005.
15. Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), diferentes Resoluciones, en <<http://www.creg.gov.co>>
16. Empresa de Energía del Pacífico [en línea], consultado el 14 de mayo de 2009 en <<http://www.epsa.com.co>>
17. Farrell, M. J. "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, vol. 120, no. 3, Royal Statistical Society, pp. 253-90, 1957.
18. Färe, R.; Primont, D. *Multi-Output Production and Duality: Theory and Applications*, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1995.
19. Hattori, T. "Relative Performance of U.S. and Japanese Electricity Distribution: An Applica-

- tion of Stochastic Frontier Analysis”, *Journal of Productivity Analysis*, vol. 18, no. 3, Springer Netherlands, pp. 269-282, 2002.
20. Hjalmarsson, L.; Veiderpass, A. “Efficiency and Ownership in Swedish Electricity Retail Distribution”, *Journal of Productivity Analysis*, vol. 3, no. 1-2, Springer Netherlands, pp. 7.23, 1992.
 21. Huettnner, D.; Landon, J. “Electric Utilities: Scale Economies and Diseconomies”, *Southern Economic Journal*, vol. 44, no. 4, Southern Economic Association, pp. 883-912, 1977.
 22. Kumbhakar, S. C. “Production Frontier, Panel Data and Time-Varying Technical Inefficiency”, *Journal of Econometrics*, vol. 46, no. 1, Elsevier, pp. 201-211, 1990.
 23. Kumbhakar, S.; Lovell, C. A. K. *Stochastic Frontier Analysis*, Cambridge University Press, 2000.
 24. Congreso de la República de Colombia, *Ley 142 de 1994* [en línea], consultado el 16 de mayo de 2009 en <<http://www.alcaldiabogota.gov.co>>
 25. Congreso de la República de Colombia, *Ley 143 de 1994* [en línea], consultado el 16 de mayo del 2009 en <<http://www.alcaldiabogota.gov.co>>
 26. Malmquist, S. “Index Numbers and Indifference Surfaces”, *Trabajos de Estadística*, vol. 4, pp. 209-42, 1953.
 27. Mas-Colell, A.; Whinston, M. D.; Green, J. R. *Microeconomic theory*, Oxford University Press, 1995.
 28. Melo, L.; Espinosa, N. “Ineficiencia en la distribución de energía eléctrica: una aplicación de las funciones de distancia estocástica”, *Borradores de Economía*, no. 321, Bogotá, Banco de la República de Colombia, 2004.
 29. Neuberg, L. “Two Issues in the Municipal Ownership of Electric Power Distribution Systems”, *The Bell Journal of Economics*, vol. 8, no. 1, The RAND Corporation, pp. 303-323, 1977.
 30. Pollit, M. *Ownership and Performance in Electric Utilities: The International Evidence on Privatization and Efficiency*, Oxford University Press, 1995.
 31. Rodríguez-Pardina, M.; Rossi, M.; Ruzzier, C. “Fronteras de eficiencia en el sector de distribución de energía eléctrica: la experiencia suramericana”, documento de análisis, no. 15. Centro de Estudios Económicos de la Regulación, Universidad Argentina de la Empresa, 1999.
 32. Sandoval, A. M. “Monografía del sector de electricidad y gas colombiano: condiciones actuales y retos futuros”, *Archivos de Economía*, no. 272, Bogotá, Departamento Nacional de Planeación, 2004
 33. Weyman-Jones “Problems of Yardstick Regulation in Electricity Distribution”, en Bishop, Kay y Mayer (eds.), *The Regulatory Challenge*, Oxford University Press, 1992.

APÉNDICE 1

LISTADO DE EMPRESAS INCLUIDAS EN LAS ESTIMACIONES

Central Hidroeléctrica de Caldas S. A. E. S. P.

Centrales Eléctricas de Nariño S. A. E. S. P.

Centrales Eléctricas del Cauca S. A. Empresa de Servicios Públicos

Centrales Eléctricas del Norte de Santander S. A. E. S. P.

Codensa S. A. E. S. P.

Compañía de Electricidad de Tuluá S. A. E. S. P.

Compañía Energética del Tolima S. A. E. S. P.

Electrificadora de La Costa Atlántica S. A. E. S. P.

Electrificadora del Caqueta S. A. E. S. P.

Electrificadora del Caribe S. A. E. S. P.

Electrificadora del Huila S. A. E. S. P.

Electrificadora del Meta S. A. E. S. P.

Empresa de Energía de Arauca

Empresa de Energía de Boyaca S. A. E. S. P.

Empresa de Energía de Cundinamarca S. A. E. S. P.

Empresa de Energía de Pereira S. A. E. S. P.

Empresa de Energía del Bajo Putumayo S. A. E. S. P.

Empresa de Energía del Pacífico S. A. E. S. P.

Empresa de Energía del Quindío S. A. E. S. P., Empresa de Servicios Públicos

Empresa de Energía Eléctrica del Departamento del Guaviare S. A. E. S. P.

Empresa Municipal de Energía Eléctrica S. A. E. S. P.

Empresas Municipales de Cali E. I. C. E. E. S. P.

Empresas Públicas de Medellín E. S. P.

Empresas Públicas de Yarumal E. S. P.