

# FORMACIÓN Y PRONÓSTICO DEL PRECIO DIARIO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA CADENA NARE-GUATAPÉ-SAN CARLOS

ALEJANDRO ROMERO

*mromero@internexa.com  
Internexa S.A.-Medellín.*

LUIS CARVAJAL

*lfcarvaj@unalmed.edu.co  
Profesor de la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín.*

Recibido para revisar 25 de Febrero de 2003, aceptado 1 de Abril de 2003, versión final 6 de Junio de 2003.

**RESUMEN:** Este trabajo plantea tres tipos de metodologías para la comprensión y pronóstico de los precios diarios de la energía eléctrica de la cadena Nare-Guatapé-San Carlos: modelo lineal multivariado, modelo autorregresivo determinístico y descomposición en series de Fourier. El precio de la energía eléctrica de una central depende no solamente del nivel del embalse y del caudal del río propio, sino también del embalse y sus respectivos afluentes aguas abajo o aguas arriba. En cuanto al pronóstico de los precios estos se pueden modelar con un proceso autorregresivo. El pronóstico sigue la tendencia y captura de los precios con aceptable precisión, especialmente para los valores máximos debido a los bajos caudales y volúmenes de embalse y teniendo en cuenta la variabilidad del precio para embalses de regulación diaria, semanal y mensual.

**PALABRAS CLAVES:** Precio de Energía, Modelo Lineal Multivariado, Modelo Autorregresivo, Series de Fourier, Pronóstico de Precios de Energía Eléctrica.

**ABSTRACT:** This work shows three different methodologies for the understanding and forecast of the electric energy prices in the chain Nare – Guatapé – San Carlos: lineal multivariate model, autoregressive deterministic model and Fourier series decomposition. The electric energy price depends basically of the reservoir level and river flow, not only its own but the reservoir down and up waters. About prices forecast, they can be modeled with an autoregressive process. Prices forecast follows the tendency and captures with acceptable precision the maximum prices due specially to the low hydrology and price variability for daily and weekly regulation reservoirs.

**KEYWORDS:** Energy Price, Lineal Multivariate Model, Autoregressive Model, Fourier Series, Forecast of the Electric Energy Prices.

## 1. INTRODUCCIÓN

La historia reciente del Sector Eléctrico de Colombia (*SEC*), se caracteriza por un cambio total en las políticas de generación, transmisión, distribución y comercialización a partir del año 1994 con la ley 142, que regula los servicios públicos y la ley 143 que regula el sector eléctrico

(*página web ISA*). Estos cambios obedecen esencialmente a las políticas de privatización del sector durante la última década, al respecto se implementaron nuevos esquemas de operación en los cuales se separa la generación, distribución y comercialización y se controla la conformación de monopolios (*Smith y Villegas, 1997; Romero y Vuelvas, 2002*).

Antes de la nueva estructura el despacho de la energía eléctrica se hacía bajo el criterio de

mínimo costo, utilizando programas de optimización que daban como resultado el costo de la energía para cada central hidráulica y térmica del país. A partir del 20 de julio de 1995, el sistema cambió a una estructura de competencia en la cual el precio de la energía depende de la oferta que hacen las empresas dueñas de las centrales y cuyo orden de despacho se hace por mérito de precio. Este nuevo esquema está regulado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas –CREG (CREG, 1995; ISA-UNAL, 1999).

A raíz de la competencia que se ha establecido y de que la disponibilidad del recurso agua, depende de la variabilidad espacial y temporal de éste, y de la influencia del Fenómeno del El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) en la Hidrología de Colombia (Mesa et al, 1997), los modelos que permiten comprender y pronosticar los precios de oferta se convierten en herramientas de apoyo en la *Bolsa de Energía* y de operación de los embalses. Por lo tanto un buen pronóstico puede maximizar los ingresos y optimizar la operación, especialmente si se tiene en cuenta que el sistema de generación del país tiene un 68% de componente hidráulica y un 32% de componente térmica.

El precio de un bien o producto se puede considerar en un mercado de libre competencia como la consecuencia monetaria de la producción de un artículo o servicio que genera bienestar (Azqueta Oyarsun, 1994; EPA, 1995), en este caso energía eléctrica (MW-H). El precio depende de la disponibilidad del recurso, es decir, volumen almacenado y caudal que entra al embalse considerando su variabilidad hidrológica. También depende de la disponibilidad de las máquinas para transformar la energía hidráulica en eléctrica, de los impuestos y de la percepción que tenga el agente que oferta ante la competencia. Un mayor conocimiento de las variables que conforman el precio de la energía eléctrica y como están relacionadas permitirá una oferta que maximice los ingresos en el largo plazo (por ejemplo 1 año), a pesar de que la operación se hace en el corto plazo (día a día).

Este artículo presenta una aproximación a la formación y pronóstico del precio de la energía para la cadena Nare – Guatapé - San Carlos, localizada en el oriente antioqueño. Se escogió esta cadena por dos razones: A) La topología de

la cadena es muy interesante por la dependencia del recurso agua entre embalses. B) Dos empresas son las propietarias de los embalses, por un lado *Empresas Públicas de Medellín* es dueña de El Peñol y Playas e *ISAGEN* es dueña de San Lorenzo y San Carlos, ver figura 1.

Se muestra el análisis de las variables que intervienen en la formación del precio tanto a nivel local como espacial con propiedades estadísticas y se pronostica los precios con modelos lineales multivariados, autorregresivos y descomposición de la señal de precios en series de *Fourier*. Estos modelos son evaluados bajo un esquema de porcentaje de acierto en el pronóstico de precios por cuartiles. Es importante anotar que se han hecho diversos trabajos para el pronóstico de precios tanto de centrales como de Bolsa, uno de ellos comprende la utilización de inteligencia artificial, específicamente redes neuronales (Pulgarín, 2001).

## 2. CADENA NARE – GUATAPÉ - SAN CARLOS

En la Figura 1, se muestran la topología de la cadena con los embalses y ríos asociados. En las Tabla 1 y 2, se presentan las características hidráulicas del sistema.

La información para este trabajo procede de la Bolsa de Energía y de los Informes de Operación de ISA, la cual se encuentra a nivel horario y diario. En este caso los precios de oferta y de bolsa están a nivel horario y los caudales y niveles de embalse a nivel horario. Por lo tanto para compatibilizar la información, fue necesario promediar los precios, ponderando las 24 horas por bloques, considerando los dos picos típicos que presentan los precios de oferta en el día y que están en consonancia con la curva de carga del sistema. Para cada embalse se tiene el caudal, nivel de embalse, precio de oferta y disponibilidad hidráulica. Además, como este sistema está inmerso en el sistema del SEC, se considera también el precio de bolsa, el cual está determinado por la entrada del último recurso (agua, carbón o gas) para atender la demanda de la hora. La asignación de entrada de los recursos o centrales se hace por mérito de precios, es decir, del precio menor al mayor.

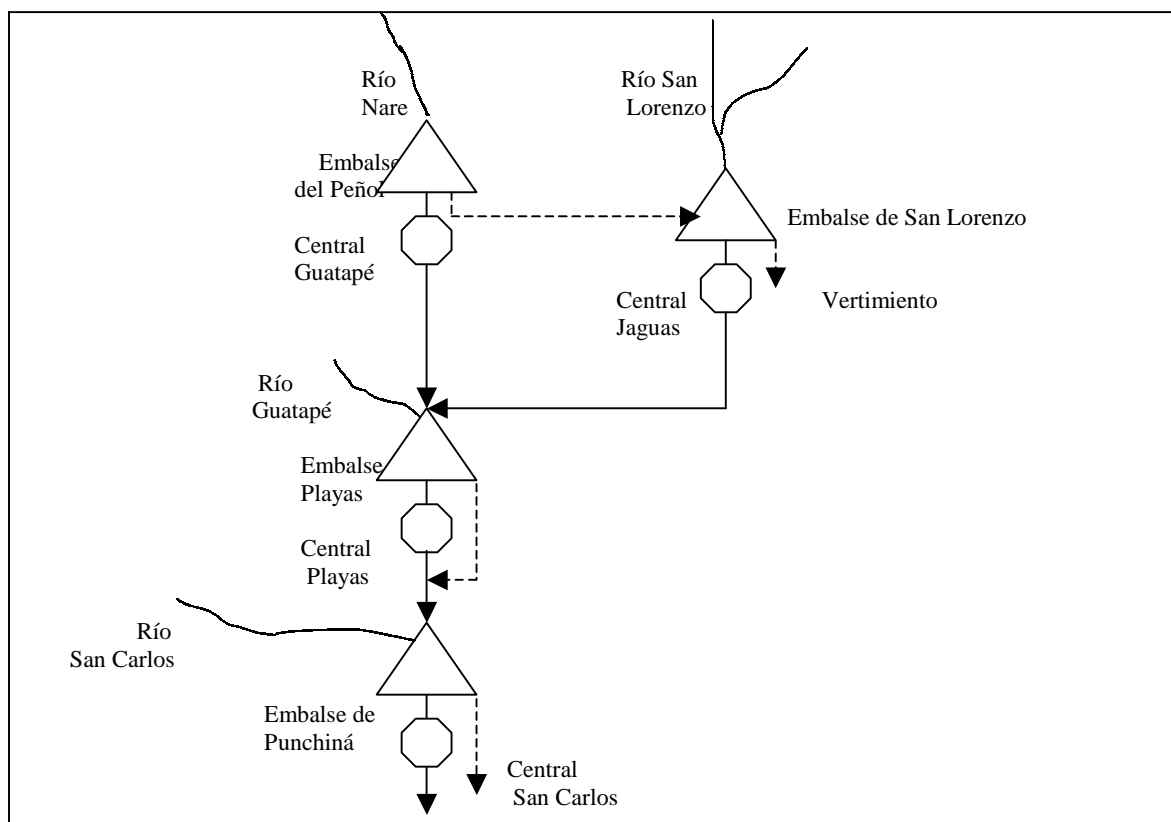


Figura 1. Configuración de la cadena Nare-Guatapé-San carlos.

Tabla 1. Características hidráulicas de la cadena Nare-Guatapé-San Carlos.

Parámetro/Embalse	Peñol	San Lorenzo	Playas	Punchiná
Caudal medio ( $m^3/s$ )	45.5	40	29	23.5
Vol max ( $Hm^3$ )	1236.26	185.52	76.80	65.77
Vol min ( $Hm^3$ )	67.36	36.67	20.67	16.42
Vol útil ( $Hm^3$ )	1168.94	148.85	56.13	49.04
Pot. Inst. (MW)	560	170	200	1240

Fuente: ISA, Informes de operación.

Tabla 2. Mínimos operativos superiores e índices de disponibilidad hidráulica de los embalses (1999).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
Embalse	Mínimo operativo superior ( $Hm^3$ )											
Peñol	335.0	267.2	234.5	234.5	184.2	200.6	234.5	243.9	250.9	267.2	317.5	317.5
Playas	20.7	37.5	33.8	30.9	29.1	30.0	30.0	30.9	31.9	32.8	35.6	35.6
San Lorenzo	66.44	57.94	49.43	47.3	40.9	100.4	45.2	49.4	51.5	53.7	57.9	60.05
San Carlos	35.2	35.77	31.24	31.24	18.05	19.69	20.02	20.50	21.3	21.6	24.6	24.6
	Índices de disponibilidad Hidráulica											
Guatapé	0.98	0.96	0.99	1.00	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Playas	0.99	0.98	0.96	0.82	1.00	0.99	1.00	0.94	0.95	0.99	1.00	1.00
Jaguas	0.98	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99	1.00	0.89	0.95	1.00	0.99	0.99
San Carlos	1.00	1.00	0.99	1.00	0.98	0.92	0.91	0.96	0.93	0.94	0.91	1.00

Fuente: ISA, Informes de Operación.

La información utilizada contempla el período de enero 1 de 1996 a febrero 11 de 2001. Para las variables consideradas se realizó un análisis de correlación cruzado con rezagos de -6 a +6 días. De la Tabla 3 a la Tabla 5, se presentan los valores más importantes para la información

cruzada de caudal vs precio de planta, precios de planta cruzados y nivel de embalse vs precio de planta, respectivamente. En paréntesis se presenta el respectivo rezago, si el valor es negativo la columna precede a la fila y viceversa.

Tabla 3. Valores representativos de correlación entre caudal vs precio central.

Río/Precio central	Nare	Guatapé	San Lorenzo	San Carlos
Guatapé	-0.47(0)	-0.43 (+5)	-0.45(-13)	-0.22(-13)
Playas	-0.43(-13)	-0.47(+9)	-0.43(+13)	-0.22(+13)
Jaguas	-0.46 (-1)	-0.38 (+5)	-0.46(+3)	-0.21(+3)
San Carlos	-0.34(+13)	-0.37(+13)	-0.36 (+13)	-0.08(+11)

Tabla 4. Valores representativos de correlación entre los precios de las centrales.

Precio central / Precio central	Guatapé	Playas	Jaguas	San Carlos
Guatapé	1.00	---	---	---
Playas	0.85(0)	1.00	---	---
Jaguas	0.80(-13)	0.79(+5)	1.00	---
San Carlos	0.67 (-4)	0.71(0)	0.75(0)	1.00

Tabla 5. Valores representativos de correlación entre nivel de embalse vs precio central.

Nivel / Precio central	Guatapé	Playas	San Lorenzo	San Carlos
Guatapé	-0.48(-13)	-0.50(-13)	-0.47(-13)	-0.35(-13)
Playas	-0.42(-13)	-0.47(-13)	-0.38(-13)	-0.38(-13)
San Lorenzo	-0.22(-13)	-0.25(-13)	-0.24(-13)	-0.25(-13)
San Carlos	-0.30(-13)	-0.35(-13)	-0.28(-13)	-0.44(-13)

### 3. METODOLOGÍAS DE PRONÓSTICO DE PRECIOS

Para el pronóstico de precios se plantean tres tipos de modelos: lineal multivariado, autorregresivos y descomposición en series de *Fourier*. Como hipótesis de partida los modelos propuestos buscan reproducir las siguientes condiciones (*Nogales et al, 2002*):

- Altas frecuencias
- Media y varianza no constante
- Estacionalidad múltiple
- Efecto calendario
- Alta volatilidad
- Precios outliers

A la información de precios se le aplicó un filtrado previo con un promedio móvil de 7 días y se transformó al campo logarítmico para disminuir la variabilidad de ésta. Por último se estandarizaron las series y se hicieron los ajustes para cada modelo

#### 3.1 Modelo lineal multivariado (*MLM*)

Un modelo lineal multivariado es de la forma (*Peña, 1992*):

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (1)$$

Donde:

$Y$  es la variable dependiente

$a_i$  son los parámetros de la regresión

$X_i$  son las  $n$  variables independientes

La selección de las variables independientes se hizo bajo el criterio de parsimonia y se involucraron en total 13 variables. Por cada embalse: precio de oferta, caudal y nivel de embalse. Además del precio de bolsa. Este análisis arrojó las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

$$\text{Precio Guatapé} = 0.645013 - 0.28401 * \text{Caud R. Guatapé} + 0.156854 * \text{Caud R. San Carl} - 0.159471 * \text{Nivel Peñol} + 0.112538 * \text{Nivel Punchiná} + 0.199875 * \text{P.Bolsa} + 0.10356 * \text{P.Jag} + 0.581448 * \text{P. Play} + 0.0811979 * \text{P. San Carlos.}$$

$$\text{Coef deter: } 0.926 \quad (2)$$

$$\text{Precio Jaguas} = 0.691285 + 0.18964 * \text{Caud R. Nare} - 0.441 * \text{Caud San Lorenzo} - 0.408251 * \text{Nivel Peñol} - 0.9807 * \text{Nivel San Lorenzo} + 1.28183 * \text{Nivel Playas} + 0.492651 * \text{Nivel San Carlos} + 0.452279 * \text{P Bolsa} + 0.190206 * \text{P Guatapé} + 0.156659 * \text{P. Playas} + 0.193746 * \text{P San Carlos.}$$

$$\text{Coef deter: } 0.869 \quad (3)$$

$$\text{Precio Playas} = 1.00437 - 0.115179 * \text{Caud R Nare} + 0.389262 * \text{Caud San Lorenzo} - 0.625258 * \text{Caud R. Guatapé} + 0.19742 * \text{Caud R. San Carlos} + 0.201943 * \text{Nivel Peñol} - 0.746592 * \text{Nivel Play} + 0.0867143 * \text{P. Bolsa} + 0.6198 * \text{P. Guatapé} + 0.100595 * \text{P. Jaguas} + 0.152894 * \text{P. San Carlos}$$

$$\text{Coef deter: } 0.923 \quad (4)$$

$$\text{Precio San Carlos} = -1.08222 + 0.78009 * \text{Caud R. Nare} - 0.640402 * \text{Caud San Lorenzo} - 0.702491 * \text{Caud R. Guatapé} + 0.351043 * \text{Caud R. San Carlos} + 0.879931 * \text{Nivel Peñol} + 0.345612 * \text{Nivel Playas} - 1.30953 * \text{Nivel Puchiná} + 0.575835 * \text{P. Bolsa} + 0.13333 * \text{P. Guatapé} + 0.161408 * \text{P Jaguas} + 0.232045 * \text{P. Playas}$$

$$\text{Coef deter: } 0.895 \quad (5)$$

Es muy importante anotar que por la disponibilidad de la información los ajustes se realizaron con los caudales correspondientes al día anterior  $t-1$  y a los niveles de embalse al final

del día anterior,  $t-1$ . Los precios de la energía en el tiempo  $t$  se conocen para ofertar en el día  $t+1$ .

### 3.2 Modelo Autorregresivo determinístico (AR(p))

Un modelo autorregresivo determinístico  $AR(p)$  es de la forma (Peña, 1992):

$$Y_t = a_1 Y_{t-1} + a_2 Y_{t-2} + \dots + a_p Y_{t-p} \quad (6)$$

Donde:

$Y$ : serie de tiempo

$a$ : parámetro del modelo

$p$ : orden del modelo

Los análisis de auto-correlación serial hasta 7 días muestran que las series de precios tienen una alta persistencia e incluso para rezagos mayores. Por lo tanto, se ajustaron modelos autorregresivos de orden 7, aunque existen criterios para encontrar el orden del modelo, se consideró el período de una semana para no calcular autorregresivos de mayor orden. Las ecuaciones que se obtuvieron son las siguientes:

$$\text{Precio Guatapé}(t) = 0.0296533 + 1.101 * \text{PGuat}(t-1) - 0.11338 * \text{PGuat}(t-2) + 0.0303852 * \text{PGuat}(t-3) + 0.0263736 * \text{PGuat}(t-4) - 0.0730988 * \text{PGuat}(t-5) + 0.0139259 * \text{PGuat}(t-6) + 0.0986363 * \text{PGuat}(t-7) \quad (7)$$

$$\text{Precio Jaguas}(t) = 0.00461096 + 0.807723 * \text{PJag}(t-1) + 0.158059 * \text{PJag}(t-2) - 0.00732476 * \text{PJag}(t-3) + 0.0617221 * \text{PJag}(t-4) - 0.0500004 * \text{PJag}(t-5) + 0.0265587 * \text{PJag}(t-6) + 0.00121726 * \text{PJag}(t-7) \quad (8)$$

$$\text{Precio Playas}(t) = 0.0314315 + 0.871839 * \text{PPlayas}(t-1) + 0.0244922 * \text{PPlayas}(t-2) + 0.0461883 * \text{PPlayas}(t-3) - 0.0192672 * \text{PPlayas}(t-4) + 0.0387761 * \text{PPlayas}(t-5) - 0.00687228 * \text{PPlayas}(t-6) + 0.0373305 * \text{PPlayas}(t-7) \quad (9)$$

$$\text{Precio San Carlos}(t) = 0.0538944 + 0.875284 * \text{PSanC}(t-1) + 0.00697673 * \text{PSanC}(t-2) + 0.891466 * \text{PSanC}(t-3) + 0.00309548 * \text{PSanC}(t-4) - 0.010025 * \text{PSanC}(t-5) +$$

$$0.00477058*PSanC(t-6) + 0.0183547*PSanC(t-7) \quad (10)$$

### 3.3 Modelos con descomposición en serires de Fourier (SF)

Una señal puede estar compuesta por tantos armónicos como el número de datos de la serie lo permita (*hasta n/2*) y cada armónico tiene asociado su respectiva frecuencia. Matemáticamente la representación de una señal en series de *Fourier* (Levi, 1980, Shahin et al, 1993) es:

$$Y(t) = A_0 + \sum_{j=1}^{\alpha} (A_j \cos(2\pi jft) + B_j \text{sen}(2\pi jft)) \quad (11)$$

Para determinar los coeficientes de  $a_n$  y  $b_n$  se utilizan las ecuaciones 12 y 13.

$$A_j = \frac{2}{T} \int_0^T Y(t) \cos(2\pi jft) dt \quad (12)$$

$$B_j = \frac{2}{T} \int_0^T Y(t) \text{sen}(2\pi jft) dt \quad (13)$$

Donde:

$Y(t)$  es la serie de precios en campo logarítmico,

$A_0$  es una constante

$T$  es el período

$f$  es la frecuencia

$A_j$  y  $B_j$  son los coeficientes del armónico  $j$

$j=1,2,3...$  son los armónicos

En la tabla 6 se presentan los coeficientes y el porcentaje de la varianza explicada por los armónicos empleados.

Se estimó el espectro de potencias para las series de precios, presentando un pico muy marcado para las cuatro series en una frecuencia muy baja, aproximadamente  $0.01 \text{ días}^{-1}$ , lo que implica un período de 100 días (Tranco, 2000).

El análisis arrojó un conjunto de armónicos que modelan las frecuencias de largo y mediano plazo. Para las frecuencias altas o de corto plazo se recurrió a la modelación de una serie residual

de precios. Esta serie se obtiene restando de la serie transformada la suma de los armónicos representativos. Para modelar la serie residual de precios de cada central se utilizó un modelo autorregresivo, correspondiente a las ecuaciones 14, 15, 16 y 17.

Tabla 6. Coeficientes  $A_j$ ,  $B_j$  y porcentaje de varianza explicada por armónico

Planta	Armónico	$A_j$	$B_j$	% varianza
Guatapé	1	0.200	0.058	38.6
	2	0.100	0.087	15.7
	3	0.100	0.130	24.0
	4	-0.021	-2.46e-13	0.4
Jaguas	1	0.500	0.147	88.0
	2	-0.010	-0.020	0.16
	3	0.010	0.050	0.84
	4	-0.100	-1.85e-13	3.24
Playas	1	0.200	0.098	53.4
	2	0.090	0.100	19.5
	3	-0.020	-0.030	1.4
	4	-11e-15	-2.6e-13	0.01
San Carlos	1	-0.200	0.050	35.17
	2	0.100	0.120	20.2
	3	-0.010	-0.130	14.1
	4	-0.030	0.110	10.8

$$\begin{aligned} \text{Precio residual de Guatapé}(t) = & 0.000976799 + \\ & 1.46419 * \text{Precio residual de Guatapé}(t-1) - \\ & 0.886679 * \text{Precio residual Guatapé}(t-2) + \\ & 0.398444 * \text{Precio residual Guatapé}(t-3) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{Precio residual de Jaguas}(t) = & 0.00263226 + \\ & 1.02855 * \text{Precio residual Jaguas}(t-1) - \\ & 0.0163054 * \text{Precio residual Jaguas}(t-2) - \\ & 0.0481133 * \text{Precio residual Jaguas}(t-3) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{Precio residual Playas}(t) = & 0.0021467 + \\ & 0.847162 * \text{Precio residual Playas}(t-1) + \\ & 0.0198786 * \text{Precio residual Playas}(t-2) + \\ & 0.12241 * \text{Precio residual Playas}(t-3) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{Precio residual San Carlos}(t) = & 0.00060122 + \\ & 0.872227 * \text{Precio residual San Carlos}(t-1) + \\ & 0.0101808 * \text{Precio residual San Carlos}(t-2) + \\ & 0.102913 * \text{Precio residual San Carlos}(t-3) \end{aligned} \quad (17)$$

#### 4. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE PRONÓSTICO DE PRECIOS

La información para este trabajo se divide en dos partes. El 70% inicial de la información (1 de enero de 1996 a 24 de julio de 1999) se utilizó como período de calibración para la estimación de los parámetros de los modelos. El restante 30% (25 de julio de 1999 a 1 de febrero de 2001) se utilizó como período de validación de los modelos. Este proceso de validación incluye dos etapas: una es la validación de los precios simulados para cada una de las cuatro centrales contra los precios históricos y la segunda etapa involucra la simulación de la cadena en Dinámica de Sistemas para generar nuevos valores de

niveles de embalse. Esta simulación incluye características hidráulicas de la cadena, así como mínimos operativos superiores, índices de disponibilidad hidráulica, precios de bolsa y precios de energía pronosticados,. Todo esto con el objetivo de simular los niveles de embalse. Como criterio para cuantificar la bondad de los modelos se utilizó el análisis por cuartiles para el período de calibración. Este criterio implica dividir el rango de precios históricos en cuatro intervalos y determinar según el pronóstico que porcentaje de acierto se tiene para cada intervalo a través del período de validación. Las Figuras 2 a 5, presentan los pronósticos para un día y las Tablas 7 a 18 presentan los resultados del criterio de bondad de ajuste por cuartiles para las ventanas: de 1, 3, 7 días y el período de validación. En la Figura 2 a 5, la línea continua indica los precios históricos y la línea discontinua los precios simulados durante el período de validación.

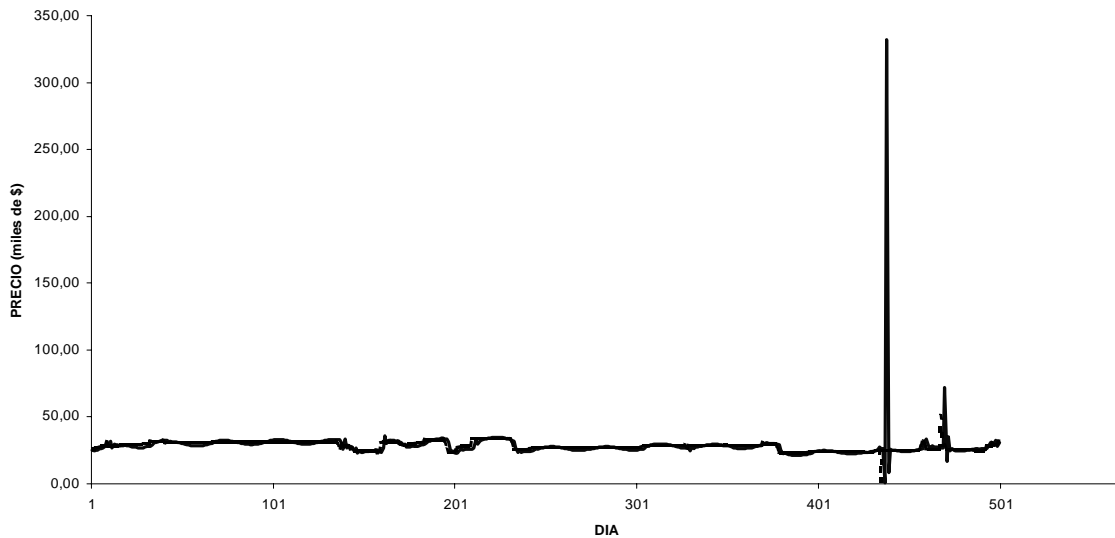


Figura 2. Comparación entre precios históricos y precios simulados para la central Guatapé. Modelo en Series de Fourier, ventana 1 día.

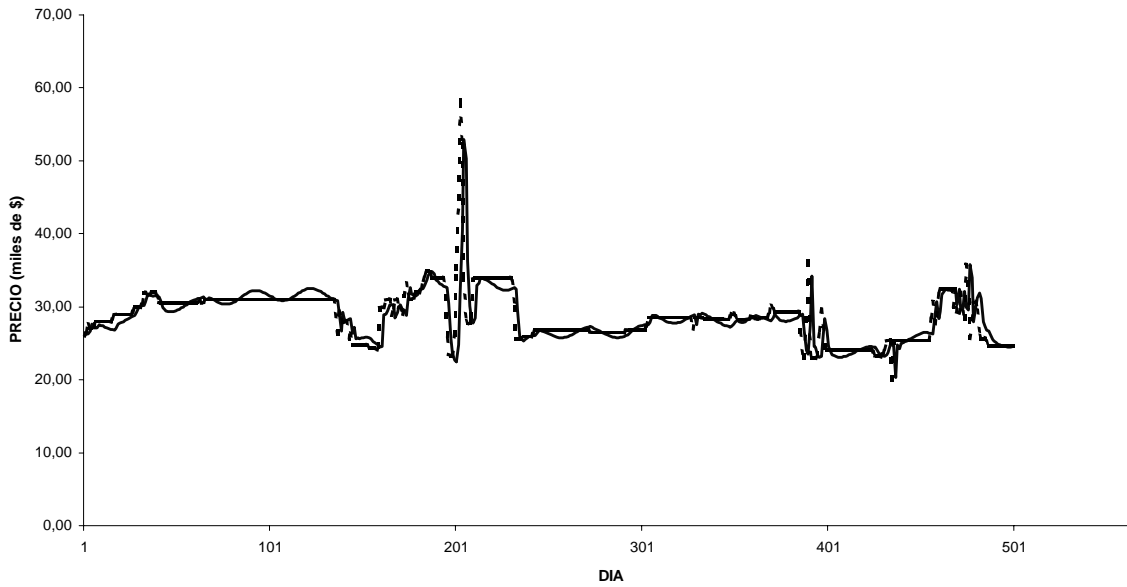


Figura 3. Comparación entre precios históricos y precios simulados para la central Playas. Modelo Series de Fourier, ventana 1 día.

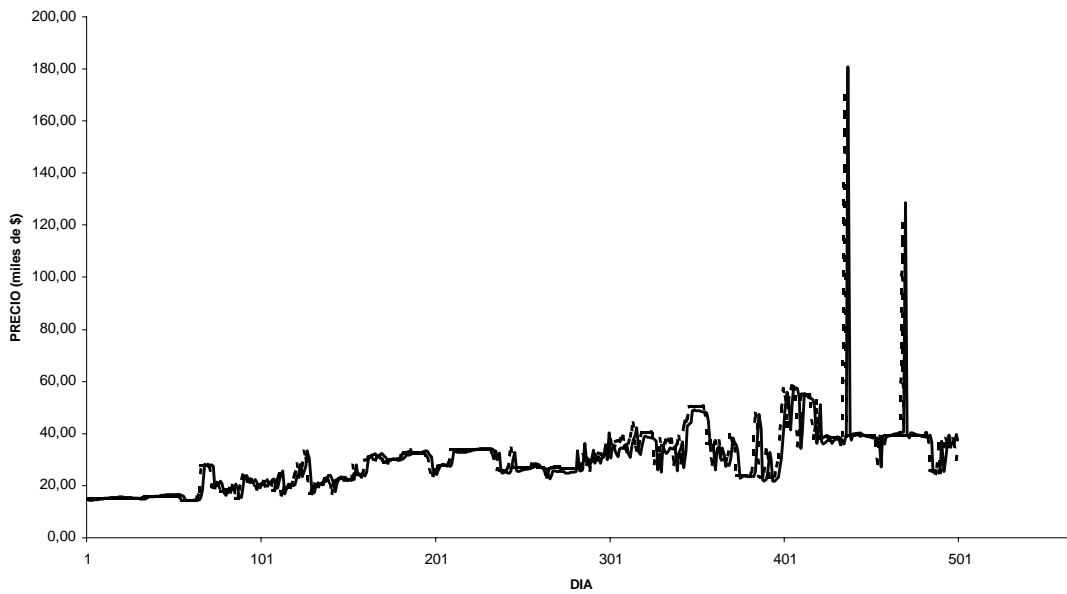


Figura 4. Comparación entre precios históricos y precios simulados para la central Jauas. Modelo en Series de Fourier, ventana 1 día.



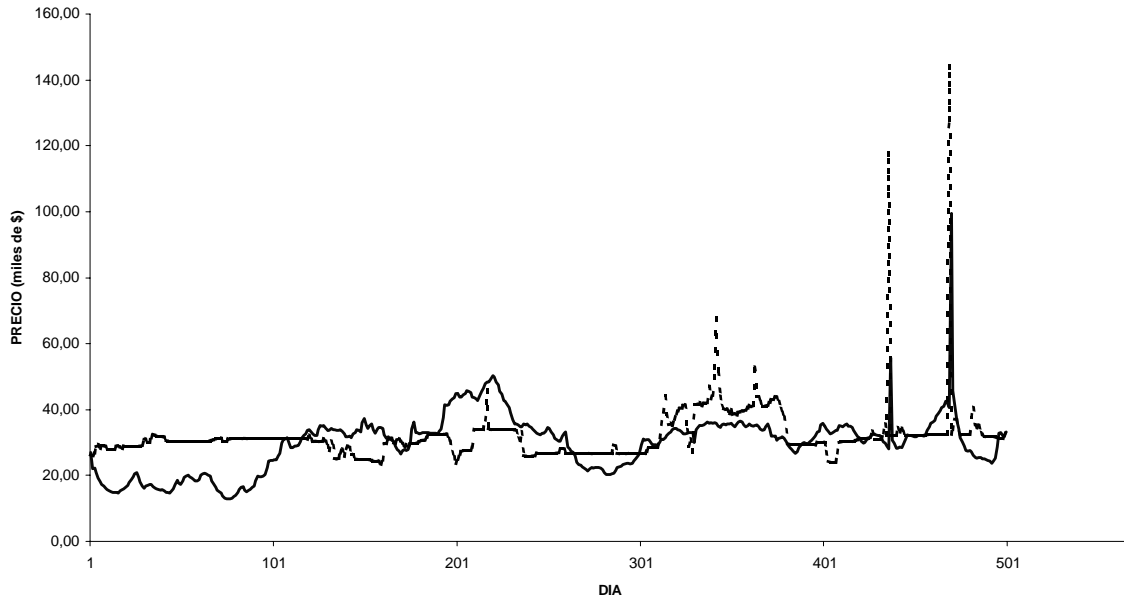


Figura 5. Comparación entre precios históricos y precios simulados para la central San Carlos. Modelo en Series de Fourier, ventana de 1 día.

Tabla 7. Porcentaje de acierto por cuartiles para el *MLM – Guatapé*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
1447,92 22941,41	100,00	66,67	100,00	66,67
22941,41 44434,90	1,17	95,53	0,97	35,92
44434,90 65928,39	0,00	0,00	0,00	0,00
65928,39 87421,88	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 8. Porcentaje de acierto por cuartiles para el *MLM – Playas*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
15062,50 25873,70	100,00	89,83	100,00	99,15
25873,70 36684,90	0,23	30,52	0,23	3,64
36684,90 47496,10	0,00	11,0	0,00	0,00
47496,10 58307,30	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 9. Porcentaje de acierto por cuartiles para el *MLM – Jaguas*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
14214,00 53051,13	99,82	99,82	99,82	98,91
53051,13 91888,26	0,00	0,00	0,00	0,00
91888,26 130725,39	0,00	0,00	0,00	0,00
130725,39 169562,52	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 10. Porcentaje de acierto por cuartiles para el *MLM - San Carlos*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
26437,50 28980,78	64,03	5,76	63,31	41,73
28980,78 31524,06	17,20	3,23	16,67	13,98
31524,06 34067,34	11,11	0,00	11,11	13,49
34067,34 36610,62	17,95	80,00	17,95	33,33

Tabla 11. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo  $AR(p)$ -*Guatapé*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
1447,92	22941,41	0,00	0,00	66,67
22941,41	44434,90	96,89	96,89	8,54
44434,90	65928,39	63,16	63	0,00
65928,39	87421,88	16,67	17	83,33

Tabla 12. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo  $AR(p)$  – *Playas*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
15062,50	25873,70	83,90	83,90	56,78
25873,70	36684,90	88,84	88,84	86,10
36684,90	47496,10	55,56	56,00	11,11
47496,10	58307,30	0,00	0,00	0,00

Tabla 13. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo  $AR(p)$  – *Jaguas*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
14214,00	53051,13	98,19	98,19	99,64
53051,13	91888,26	26,67	26,67	0,00
91888,26	130725,39	0,00	0,00	0,00
130725,39	169562,52	0,00	0,00	0,00

Tabla 14. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo  $AR(p)$  - *San Carlos*.

Ventana/Intervalo	PV día	1 día	3 días	7 días
26437,50	28980,78	53,96	53,96	51,80
28980,78	31524,06	73,66	73,66	44,09
31524,06	34067,34	45,24	45,26	23,02
34067,34	36610,62	46,15	46,00	29,06

Tabla 15. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo en  $SF$ -*Guatapé*.

Ventana/Intervalo	1 día
1447,92	33,33
22941,41	92,82
44434,90	55,00
65928,39	42,00

Tabla 17. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo en  $SF$  - *Jaguas*

Ventana/Intervalo	1 día
14214,00	99,09
53051,13	66,67
91888,26	0,00
130725,39	0,00

Tabla 16. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo en  $SF$  - *Playas*

Ventana/Intervalo	1 día
15062,50	78,81
25873,70	87,48
36684,90	67,00
47496,10	50,00

Tabla 18. Porcentaje de acierto por cuartiles para el modelo en  $SF$  - *San Carlos*

Ventana/Intervalo	1 día
26437,50	46,04
28980,78	9,51
31524,06	33,00
34067,34	56,00

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las ecuaciones estimadas para los precios en la cadena permiten comprender que aunque el recurso agua y las centrales no sean de la misma empresa, la conectividad de los embalses permite establecer relaciones de energía-precio y recurso-precio a corto plazo.

Los valores de correlación presentados en las Tablas 3 a 5, presentan que para el caso de caudal vs precio, los valores son negativos lo cual es totalmente lógico ya que a mayor caudal menor precio y viceversa. Los valores positivos de rezago no tienen sentido físico ya que el precio no puede preceder el caudal. Para el caso de precio vs precio, la relación de Guatapé con Playas es muy clara de 0.85 y en el mismo rezago. La relación de San Lorenzo y Playas también es muy clara e importante, 0.79 con rezago de 5 días, en este caso San Lorenzo precede a Playas, es decir, los precios de San Lorenzo están sintonizados 5 días después de los de Playas. Otra relación muy importante es la de San Lorenzo con San Carlos, con un valor de 0.75 y un rezago de cero días. Este valor de correlación implica consonancia de las series en tendencia, mas no en magnitud, ya que aunque los precios de San Carlos son muy variables, la central de Jaguas oferta en intervalos de tiempo que permiten generación y que por conectividad hidráulica puede aprovechar la central de San Carlos.

La relación de nivel de embalse vs precio, presenta valores negativos. Esta situación también es lógica ya que a mayor nivel de embalse o recurso almacenado el precio es menor y viceversa. Los valores de rezago todos son de 13 días y negativos lo que quiere decir que el precio está correlacionado con valores del nivel de embalse 13 días atrás, esto no parece muy lógico ya que la Bolsa de Energía es un mercado de corto plazo (día a día). Se puede pensar que se ha establecido un ciclo de dos semanas entre niveles de embalse y precios, considerando que los valores de correlación obtenidos alrededor de 0,5 no son estadísticamente significativos. Además, el concepto de correlación es un estadístico de tipo lineal, el cual no representa bien la asociación en este caso de una serie de

niveles de embalse que es cíclica en el año y la serie de precios que es muy variable.

La metodología de pronóstico de precios *MLM*, muestra que el precio de la energía de la central de Guatapé depende básicamente del precio de Playas, caudal del río Guatapé, Nivel de Playas y Precio de Bolsa. Con respecto a los caudales la relación es negativa, así como con los niveles de embalse. Para el precio de Jaguas es fundamental la relación con el nivel de Playas y de San Lorenzo, caudal de San Lorenzo y Precio de Bolsa. Los precios de Jaguas reflejan una alta influencia del estado del embalse de Playas, es decir, la operación de Jaguas está limitada por la generación de Playas como estrategia de operación, lo cual es muy lógico, ya que la ubicación de la central de Playas está en la zona media de la cadena, el cual es punto obligatorio de tránsito para el recurso agua. Por lo tanto, precios altos en Jaguas indican niveles de embalse altos en Playas, y la generación en Jaguas es mínima, de esta forma se regula el recurso en Jaguas. Para el precio de Playas es fundamental el caudal y nivel de Playas, y el precio de la central de Guatapé. Este es un embalse que depende mucho del caudal turbinado en el Peñol y teniendo en cuenta que la regulación del embalse es semanal. El precio de la central de San Carlos depende de su propio nivel de embalse y del nivel de embalse en Guatapé, caudal del río Nare y río Guatapé. Situación muy lógica para este embalse porque la regulación es diaria y el aporte importante de caudal proviene de la regulación que provee el embalse del Peñol y el tránsito por el embalse de Playas. Es muy importante resaltar que los coeficientes de determinación de los ajustes son buenos, mayores del 87%. Además, si se considera que los precios reflejan una alta variabilidad, especialmente por las condiciones hidrológicas. El análisis de cuartiles muestra unos resultados de pronóstico aceptables. Se observa una buena posibilidad para predecir precios en todas las centrales por encima del 64% y se alcanza el 100% para centrales como Guatapé, Playas y Jaguas. Hay que aclarar que los intervalos 3 y 4 corresponden a valores altos de precios, esto quiere decir que los dos primeros intervalos representan aproximadamente el 90% de los precios del período de validación.

Para el modelo  $AR(p)$ , los cuatros ajustes muestran una marcada dependencia de un día, esto quiere decir que un  $AR(1)$  es suficiente para modelar las series de precios. Para la central de San Carlos también se tiene una fuerte relación con el rezago de tres días, esto quiere decir, que debido a la regulación diaria del embalse, un día el precio es alto y al siguiente es bajo. El análisis de cuartiles arroja buenos resultados para los precios bajos y mejora para los medios. La persistencia de la información ayuda al pronóstico y muestra que las cuenca tienen un rezago de por lo menos un día que permite modular la señal de precios. Es importante anotar que el mejor resultado es para el embalse del Peñol, situación muy lógica por su regulación anual. El análisis de cuartiles muestra que los  $AR(p)$  son una buena opción especialmente para las Centrales de San Carlos y Playas y para Guatapé en el segundo intervalo de precios.

El modelo en series de *Fourier*, muestra que los precios pueden ser modelados adecuadamente como un  $AR(1)$ . De acuerdo al análisis de cuartiles el modelo presenta resultados aceptables para los precios de Jaguas y Playas y Guatapé en el segundo intervalo de precios.

En todos los modelos utilizados los precios pronosticados para la Central de San Carlos en cuanto al análisis de cuartiles presentan una distribución de acierto relativamente uniforme, esto debido a que los precios de la central están más distribuidos en el intervalo histórico de oferta y no como en las demás centrales en la cuales los precios altos son debido a situaciones de posicionamiento en la oferta más no a una relación recurso-precio.

## 6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones son:

- El embalse del Peñol es de regulación anual lo que implica precios que garanticen generación y alimentación del embalse de Playas. El precio del recurso depende básicamente del nivel de embalse y el caudal del río Nare.
- El embalse de Playas actúa como bypass en la cadena, todo recurso turbinado de Guatapé y

Jaguas es estratégico para Playas. El precio del recurso y la generación depende básicamente del Peñol, y del río Guatapé.

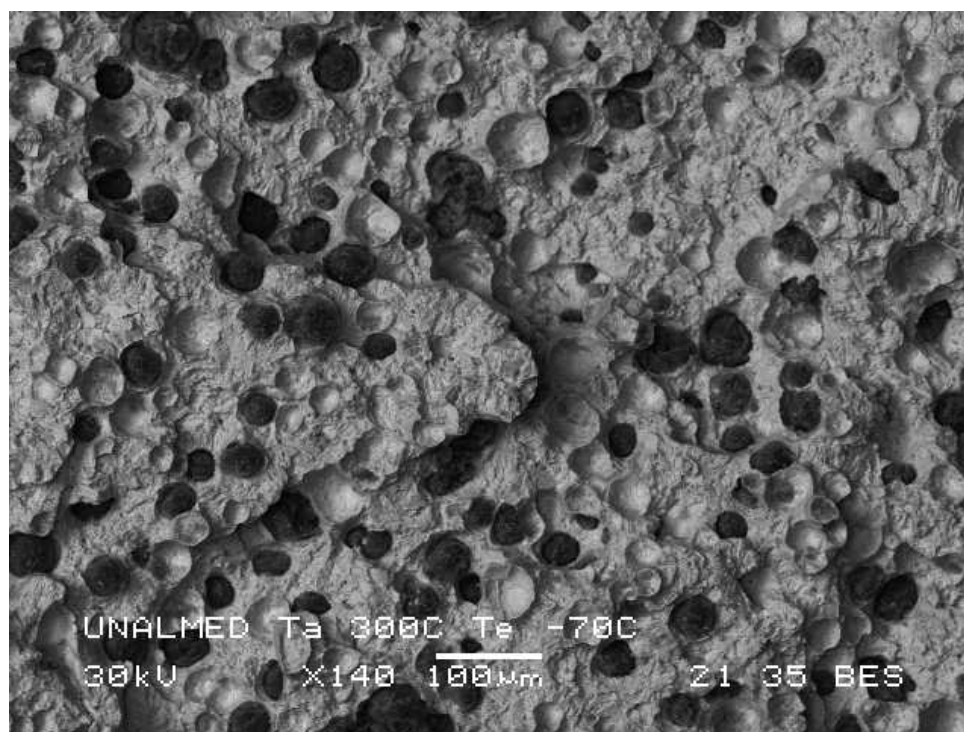
- El embalse de San Lorenzo, es de regulación mensual por lo que sus precios están muy ligados a su nivel de embalse, su caudal y el nivel de embalse de Playas. Esta última situación se presenta por el hecho de que cuando el nivel en Playas es alto el precio de Jaguas es alto y se cuida de esta forma el recurso agua, ya que la mayor generación se encuentra en la Central de San Carlos y niveles de embalse altos en Playas garantizan generación en San Carlos.
- El precio de la Central de San Carlos depende básicamente del nivel de embalse de Punchiná con regulación diaria, del caudal del río Nare y del nivel del embalse del Peñol. Debido a la poca regulación del embalse y la potencia de la planta (1240 MW) el precio es muy variable. La regulación para generar depende de la central de Guatapé y su embalse El Peñol.

Con relación a los tres tipos de modelos empleados el que mejor resultado arroja en términos generales son los  $AR(p)$ . La modelación del precio es viable con la serie de precios si se desean modelos simples, es decir, sin consideración de variables adicionales lo que permite ahorro en tiempo y manejo de información. El modelo lineal multivariado permite entender desde un punto de vista estadístico que variables del sistema embalse-central son importantes y como la disponibilidad del recurso es un factor importante para el pronóstico de precios no solo localmente sino también espacialmente. El modelo de señales en series de *Fourier*, apunta a conocer las señales intrínsecas de las series de precios, la cuales deben reflejar la hidrologías anual y semianual y la aversión o preferencia al riesgo por parte de la empresa o persona que oferta.

## REFERENCIAS

Azqueta D. *Valoración Económica de la Calidad Ambiental*. McGRAW-HILL. Madrid, 1994.

- Comisión de Regulación de Energía y Gas. *Resolución CREG 025 de 1995*.
- Interconexión Eléctrica S.A. *Informes de Operación 1997, 1998, 1999, 2000*. Medellín
- Levi, E. *Teoría y métodos de las Matemáticas Aplicadas*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1980.
- Mesa, O. et al. *Introducción al Clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1997
- Nogales, F. Forecasting next-day electricity prices by time series models. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2, (17), Pag 342-348, 2002.
- ISA-UNAL. *Opciones del Manejo del Recurso Hidroeléctrico en el Mercado Eléctrico Colombiano*. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín. 1999.
- ISA. *Ley 142 y 143*. En <http://www.isa.com.co> , junio 3 de 2003.
- Peña D. *Estadística Modelos y métodos*, tomo II, Alianza Editorial, España, 1992.
- Pulgarin, A. *Aplicación de Herramientas de Inteligencia Computacional en la Planificación de Recursos Hidráulicos*. Tesis de Magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Medellín, 2001.
- Romero, M. y Buelvas M. *Aproximación a la determinación del precio de Bolsa de la Energía en la Cadena Nare-Guatapé-San Carlos*. Trabajo dirigido de grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- Shahin, Mamdouh, Van Oorschoth , J.L. y S. J. de Lange. *Statistical Analysis in Water Resources Engineering. Applied Hydrology Monograph I*. A.A. Balkema/ Rotterdam/ Brookfield, Holanda, 1993.
- Smith, R y Villegas L. *El sector Eléctrico Colombiano-Evolución Transformación y perspectiva- Medellín* , Interconexión Eléctrica ISA, edición preliminar, 1997.
- NOAA. *El Niño / La Niña*. En <http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/> , junio 3 de 2003.



Superficie de fractura de un hierro fundido con nódulos de grafito.