

**SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACION DEL AIRE EN  
CIUDADES DE ALTURA**

**CUSCO, PERÚ. ABRIL DE 2005**



**ANÁLISIS DE INTERVENCIÓN: EFECTIVIDAD DE  
LAS POLÍTICAS PARA REDUCCIÓN DE LA  
CONTAMINACIÓN POR FUENTES MÓVILES EN  
BOGOTÁ - COLOMBIA**

**Msc. Mildred Méndez Caycedo  
Universidad de los Andes  
Colombia**



# Características Bogotá

- Bogotá localizada meseta Andina altitud 2560 m.s.n.m
- Ciudad capital Colombia población 6´789.122 habitantes.
- Temperatura promedio anual 14.8°C. Promedio Anual de precipitación 672 mm y de 1.5 m/s de velocidad de vientos.
- Inversiones térmicas ocurren enero, febrero, junio y entre agosto y diciembre.



# Estado Calidad Aire Bogotá

- Algunas áreas y ciertos periodos del año la ciudad experimenta altas concentraciones contaminantes =>  $PM_{10}$
- No problemas extremos contaminación.
- Estrategia: Ayudar a mantener bajo niveles  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ . Prevenir  $\uparrow O_3$  y  $\downarrow PM_{10}$ , TSP.
- Estrategia Largo Plazo: Mantener contaminación aire bajo niveles máximos recomendados OMS.



# Programa de control y prevención de la contaminación atmosférica en Bogotá

1. Monitoreo y recolección datos calidad aire.
2. Educación, capacitación y concientización.
3. Mejoramiento calidad y promoción de combustibles limpios.
4. Mejoramiento movilidad urbana
5. Monitoreo y control fuentes fijas y móviles.
6. Transferencia de tecnología.
7. Coordinación interinstitucional.



Políticas no pueden evaluarse en términos subjetivos



Hacia el futuro



Decisiones relativas a política, regulación e inversión ambiental deben tener sólidos argumentos cuantitativos y económicos.



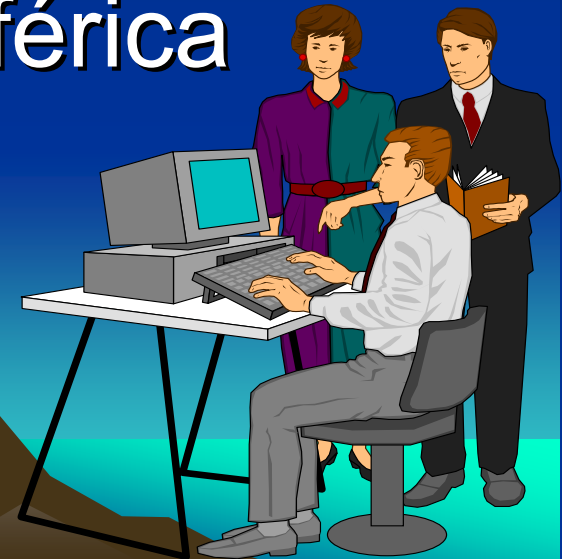
Herramientas Valoración Económica



Poderosas herramientas  
priorización gasto público



¿Cómo se puede asegurar razonablemente, que estos programas y políticas representan una forma efectiva en costo de atacar el problema de contaminación atmosférica en Bogotá?



# OBJETIVO

Utilizar la información de la RMCAB para construir un modelo de series de tiempo el cual pueda representar adecuadamente el movimiento cronológico de los contaminantes, de tal manera que sea posible realizar predicciones eficientes del comportamiento de los contaminantes y valorar la efectividad de las medidas de intervención – P y P, I/M y Transmilenio-.

# HIPOTESIS

- No se ha dado cambio esperado en nivel de contaminación por fuentes móviles Bogotá, por políticas intervención implementadas.
- El Programa de Inspección y mantenimiento no es efectivo para la disminución de la contaminación por fuentes móviles.



# Modelo Empírico

Desarrollado por Box y Tiao (1975), el modelo permitirá determinar el efecto de ciertas intervenciones conocidas sobre el comportamiento de una serie de tiempo:

- Cambio en el nivel de la serie.
- El cambio es de la forma esperada.
- Cuantificar el efecto de una política sobre el nivel y sobre la estructura de una serie.
- Establecer controles y medir su efectividad.



# Modelo General

$$y_t = f(\kappa, \xi, t) + N_t$$

donde:

$y_t = F(Y_t)$  Transformación de  $Y_t$ ,  $\text{Log } Y_t$ ,  $(Y_t)^{1/2}$  o  $Y_t$ .

$f(\kappa, \xi, t)$  Incluye efectos determinísticos del tiempo  $t$ , efectos de la variable exógena  $\xi$  (condiciones atmosféricas, patrón de tráfico o cantidad de vehículos).

$\kappa$  Sistema o Conjunto de parámetros.

$N_t$  Error ruido blanco.



# Modelo ARMA

$$y_t = a_0 + A(L) y_{t-1} + c_0 z_t + B(L) \epsilon_t$$

donde:

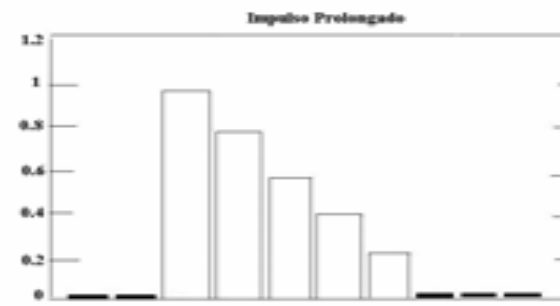
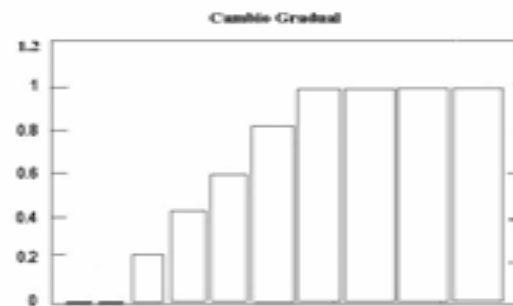
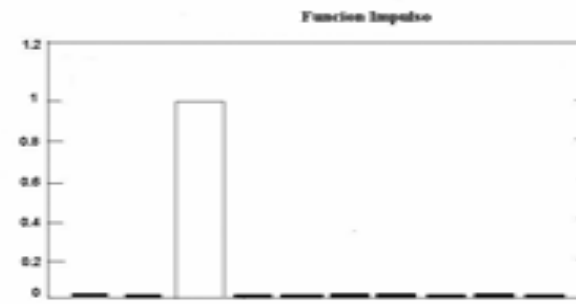
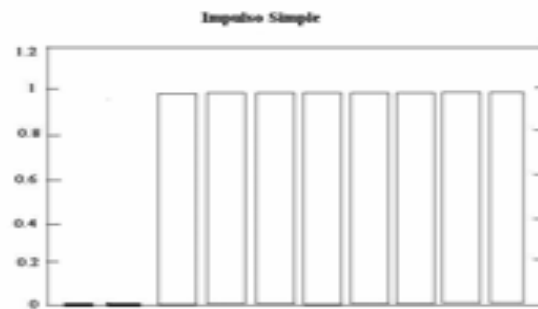
$A(L)$  ,  $B(L)$       Polinomios en el operador de rezago  $L$

$\epsilon_t$                       Error ruido blanco

$z_t$                       Variable de intervención que toma valores de acuerdo al modelo de la función de intervención.

Enders, 1995

# Funciones de Intervención Típicas



# Procedimiento Analisis de Intervención

**Paso 1.** Estimar para series tiempo contaminantes a modelar, conjunto modelos ARIMA, usando metodología Box – Jenkins. Para estimación procedimiento:

- a) Identificación
- b) Estimación
- c) Verificación

**Paso 2.** Estimar modelos para serie de tiempo de contaminación seleccionada, incluyendo el efecto de intervenciones.



### **Paso 3.** Ejecutar el diagnóstico de las ecuaciones estimadas con intervención.

1. Coeficientes estimados estadísticamente significativos a niveles convencionales y con la menor cantidad variables explicativas.
2. Residuales aproximadamente ruido blanco. Si los errores parecen ser ARCH, se debe reestimar el modelo.
3. Modelo seleccionado desempeñarse mejor que modelos alternativos.



# DATOS



# Criterios Selección Datos

1. Establecer los contaminantes ligados directamente con las fuentes emisoras.

## Contaminantes Primarios

- Bióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )
- Monóxido de Carbono (CO)
- Hidrocarburos (HC)
- Bióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ )
- Oxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )
- Material Particulado (MP)
- Plomo (Pb)

## Contaminantes Secundarios

- Bióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )
- Oxidantes fotoquímicos (ozono entre otros)
- Acidos Sulfúricos o Nítricos y sus sales

# Criterios Selección Datos

2. Determinar contaminantes encuentran en altas concentraciones según datos obtenidos de los monitoreos y cuales están asociados con el impacto de las diferentes intervenciones o políticas aplicadas.
  - El  $PM_{10}$  y  $O_3$  concentraciones exceden la norma.
  - Los contaminantes  $NO_x$  y el CO deben monitorearse.



De acuerdo con los criterios anteriores se eligieron los contaminantes  $PM_{10}$  y  $O_3$  teniendo en cuenta que:

$PM_{10}$

Mayor impacto causado por movimiento en corredores viales.

Efectos negativos sobre la salud humana.

Estimar ahorros anuales.

$O_3$

Concentraciones exceden norma a nivel superficie.

Sus niveles son difíciles de disminuir

Común en épocas de RS



# Intervenciones para control de contaminación en Bogotá.

Medida	Fecha Implementación	Disminución Prevé
Pico y placa	31 julio 1998	La autoridad ambiental no tiene parámetros de reducción. ↓ CO ↓ HC
Programa I/M	01 agosto 2000	* ↓ CO 45 % ↓ HC 55 %
Transmilenio	01 diciembre 2000	↓ PM <sub>10</sub> 30 -70 % ↓ CO 90 % ↓ HC 60 % ↓ NO <sub>x</sub> 50 %

\* Disminución por vehículo

# Criterios Selección Estaciones

- Estaciones que monitoreen contaminantes seleccionados para análisis.
- Ubicadas zonas alto flujo vehicular y no influenciadas por fuentes fija contaminación. Se eliminaron las estaciones no afectadas por intervenciones.
- Bases de datos completas y que presenten continuidad en las mediciones durante el tiempo funcionamiento de la red.



# Agregación de Observaciones

- El análisis de intervención se realizó con observaciones correspondientes a promedios mensuales de lecturas horarias de contaminantes seleccionados.
- El impacto de las medidas y el comportamiento de las variables se observa más claramente en períodos mensuales que en mediciones diarias.
- Se tomaron horas del día en que las condiciones atmosféricas o la influencia de las intervenciones produjeran cambios relevantes en el comportamiento de contaminantes.



# Estaciones y Contaminantes Seleccionados

Contaminante	Estación	Intervalo Monitoreo	No. Datos Horarios Totales	No. Datos Faltantes	% Datos en base	Criterio Agregar
Ozono	U. Nacional	08/97 - 02/02	40151	2557	93.6	JICA 8:00 -14:00
PM <sub>10</sub>	H. Olaya	08/97 - 08/01	35807	3549	90.1	Hora x Hora

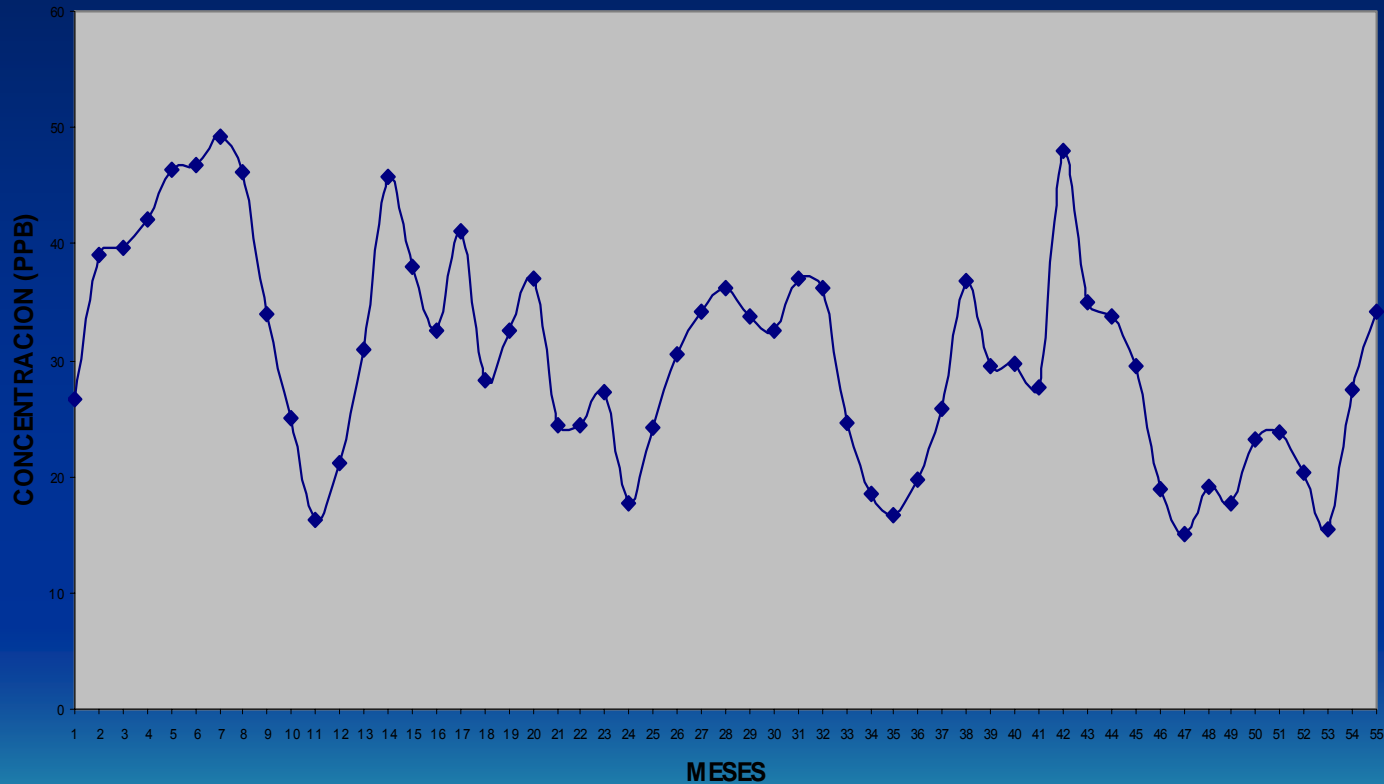
# Variable Indicadora de las Intervenciones

Medida	Función de Intervención	Variable Indicadora Intervención ( $z_t$ )
Pico y placa	Impulso Simple	$z_t = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 31/07/98 \\ 1 & \text{si } t \geq 31/07/98 \end{cases}$
Programa I/M	Cambio Gradual	$z_t = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 01/08/00 \\ 0.2 & \text{si } 01/08/00 \leq t \leq 31/12/00 \\ 1 & \text{si } t > 31/12/00 \end{cases}$
Transmilenio	Cambio Gradual	$z_t = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 01/12/00 \\ 0.2 & \text{si } 01/12/00 \leq t \leq 30/06/01 \\ 0.3 & \text{si } 30/06/01 \leq t \leq 28/02/02 \\ 0.39 & \text{si } t > 28/02/02 \end{cases}$

# RESULTADOS

Medida	% Medida	Variación Concentración O <sub>3</sub>	Variación Concentración PM <sub>10</sub>
Pico y Placa	100	Disminución 21%	-
Programa I/M	20 100	Aumento 13.62% Aumento 48.08%	
Transmilenio	20 30 39	Disminución 28.78% Disminución 43.18% Disminución 56.13%	Disminución 9.17% Disminución 13.77% Disminución 17.89%

# Serie Ozono Estación Universidad Nacional



# Estimaciones MV para modelo Ozono

Variable dependiente: concentración  
Promedio Mensual de ozono

Variable		Sin intervención		Con intervención
		Coeficiente		Coeficiente
Intercepto	MU	30.27 (12.29)*	30.32 (11.33)*	33.43 (19.52)*
Media Móvil del orden 1	MA(1)	-0.20 (-1.04)	-	-
Autoregresivo de orden 1	AR(1)	0.56 (3.39)*	0.67 (6.63)*	0.72 (6.71)*
Autoregresivo de orden 2	AR(2)	-	-	-0.42 (-3.58)*
Autoregresivo de orden 4	AR(4)	-	-	-0.27 (-3.23)*
Autoregresivo de orden 7	AR(7)	-	-	-0.38 (-4.23)*
Intervención: Pico y placa		-	-	-7.0 (-4.31)*
Intervención: Programa I/M		-	-	18.04 (3.46)*
Intervención: Transmilenio		-	-	-64.0 (-4.60)*
Criterios				
AIC		371.29	370.79	347.50
SBC		377.31	374.80	363.55

\* Significativo al 1%    \*\* Significativo al 5%    \*\*\* Significativo al 10%  
Valores t entre paréntesis

# Interpretación Variable Intervención Pico y Placa

- El valor negativo del parámetro sugiere que hay una disminución de 7 ppb en el nivel medio de la serie de ozono.
- Representa una disminución de 21%.
- El valor medio esperado de la concentración es:

$$E (\text{ppb ozono} / \text{piypla} = 1; \text{transmilenio} = 0; I/M = 0) = 33.43 - 7.0 = 26.43 \text{ ppb}$$

# Interpretación Variable Intervención I/M

- El valor positivo parámetro, sugiere incremento en nivel medio serie 3.6 ppb y posteriormente 14.44 ppb cuando medida se ha implementado en su totalidad.
- Valores correspondientes a porcentajes de incremento de concentración de ozono de 13.62% y 48.08% respectivamente.

$$E(\text{ppb ozono/ } \pi_{ypl} = 1; I/M = 0.2) = 33.43 - 7.0 + 18.04 * (0.2) = 30.03 \text{ ppb}$$

$$E(\text{ppb ozono/ } \pi_{ypl} = 1; I/M = 1; \text{transmilenio} = 0) = 33.43 - 7.0 + 18.04 * (1) = 44.47 \text{ ppb}$$

# Interpretación Variable Intervención Transmilenio

- Los resultados indican disminución en nivel medio de la serie que depende del % de la medida implementada.
- Inicialmente con 20% de medida implementada se alcanza reducción de 28.78%.
- Con un 30% una reducción de 43.18%
- Con un 39% se alcanza una disminución de 56.13%.



# Interpretación Variable Intervención Transmilenio

$$E(\text{ppb ozono/ piypla} = 1; I/M = 1; \text{transmilenio} = 0.2) = 33.43 - 7.0 + 18.04*(1) - 64.0 *(0.20) \\ = 31.67 \text{ ppb}$$

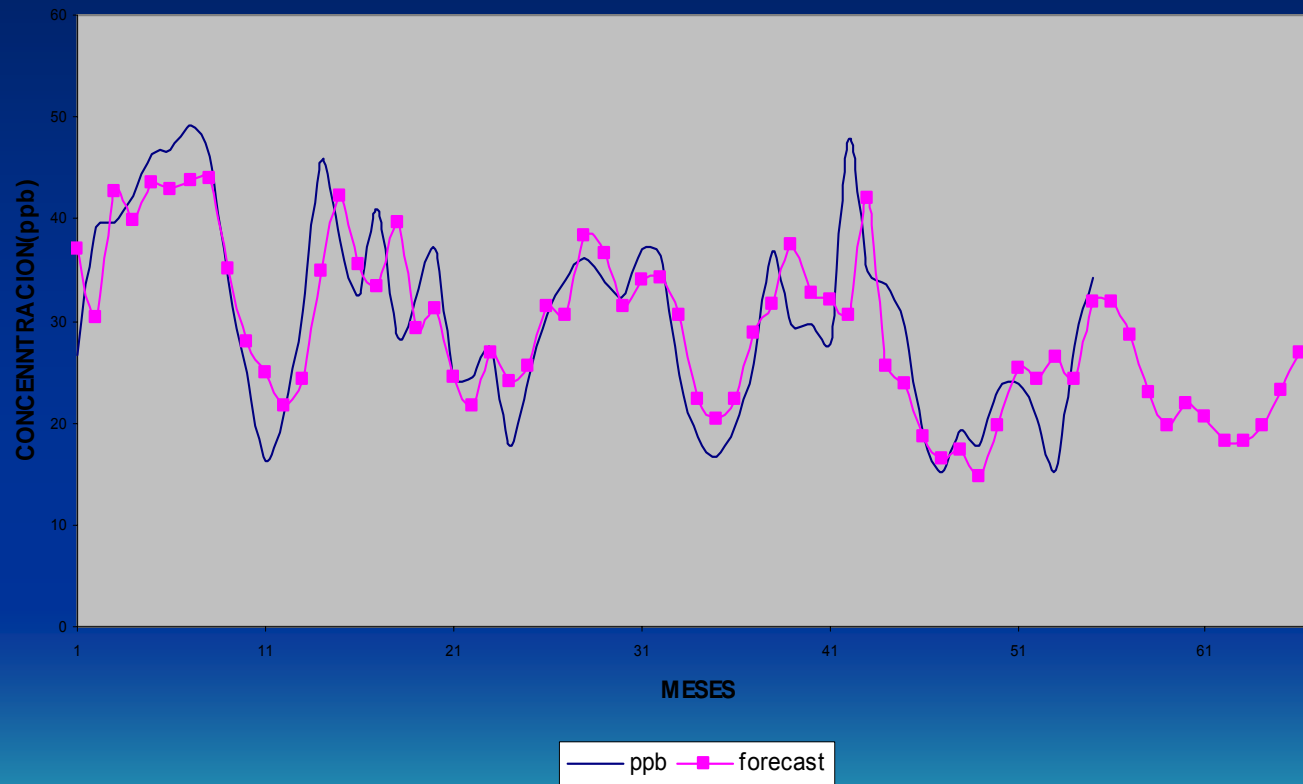
$$E(\text{ppb ozono/ piypla} = 1; I/M = 1; \text{transmilenio} = 0.3) = 33.43 - 7.0 + 18.04*(1) - 64.0 *(0.30) \\ = 25.27 \text{ ppb}$$

$$E(\text{ppb ozono/ piypla} = 1; I/M = 1; \text{transmilenio} = 0.39) = 33.43 - 7.0 + 18.04*(1) - 64.0 *(0.39) \\ = 19.51 \text{ ppb}$$

# RESULTADOS

Medida	% Medida	Variación Concentración $O_3$	Variación Concentración $PM_{10}$
Pico y Placa	100	Disminución 21%	-
Programa I/M	20 100	Aumento 13.62% Aumento 48.08%	
Transmilenio	20 30 39	Disminución 28.78% Disminución 43.18% Disminución 56.13%	Disminución 9.17% Disminución 13.77% Disminución 17.89%

# Serie y Predicciones Ozono



# Conclusiones

- Estaciones analizadas disminuyeron la concentración de contaminantes en el ambiente.
- Efecto limitado si no se toman medidas renovación real parque automotor y control de rutas de servicio colectivo.
- *Transmilenio* incide directamente en la disminución de la contaminación por fuentes móviles.
- Los resultados del análisis sugieren que la disminución en el nivel medio de concentración de los contaminantes Ozono y  $PM_{10}$ , depende del porcentaje implementado de esta medida.



# Conclusiones

- La medida correspondiente al *Programa de Inspección y Mantenimiento*, no mostró evidencia de efectividad bajo este análisis.
- Para el caso de Bogotá, la evidencia muestra que medidas de gestión de transporte como *Pico y Placa* y *Transmilenio*, y en especial esta última, son efectivas dentro de un programa de mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad.
- La reorganización integral del transporte público tendría un impacto significativo sobre la calidad de aire urbano



# Conclusiones

- Los resultados análisis podrían ser comparados y ratificados con la aplicación de un modelo fisicoquímico de calidad atmosférica, el cual incluya variables meteorológicas como dirección de los vientos, precipitación y radiación solar, lo cual se sugiere como trabajo posterior.
- En lo referente a la información generada por la RMCAB, es altamente recomendable implementar procedimientos para su validación y asignación de datos faltantes ya que, corregir los errores en los datos ocasiona costos adicionales de depuración o incorporan algunas veces diferencias importantes en los resultados.



## Análisis Costo - Efectividad Programa I/M

MEDIDA	EFFECTIVIDAD	COSTO US \$
<b>PROGRAMA I/M</b>		
20% Implementación	Aumento 13.62% O <sub>3</sub>	5.000.000.00
100% Implementación	Aumento 48.08% O <sub>3</sub>	

***“Ante unos recursos públicos cada vez más presionados por las demandas para atender la guerra y el imperativo de poner en marcha políticas para aliviar la pobreza, el tema ambiental requerirá de justificaciones más contundentes que las hasta ahora utilizadas, para demostrar la pertinencia de sus acciones”***

***Manuel Rodríguez Becerra***

***2003***



**¡GRACIAS!**

