

# Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para Ríos en Puerto Rico

Jorge Rivera Santos, Ph.D., P.E.  
Director

Instituto de Investigaciones Sobre Recursos de Agua y el  
Ambiente de Puerto Rico  
Universidad de Puerto Rico en Mayagüez

15<sup>vo</sup> Seminario de Agua Potable  
Gran Melía Hotel  
Río Grande, Puerto Rico  
20 de mayo de 2009

# Agenda

- **Introducción**
- **Objetivos**
- **Trabajos Previos**
- **Metodología**
- **Aplicaciones**
- **Conclusiones**
- **Recomendaciones**

# INTRODUCCIÓN

# Calidad del Agua

- La calidad del agua se refiere a la composición del agua en la medida en que ésta es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas.
- Puede ser utilizada como una propiedad del agua con la cual se puede indicar si el agua está, o no, contaminada.
- Existe la necesidad de implantar un método uniforme que pueda indicar la calidad del agua.

# Índice de la Calidad del Agua

- Una metodología suficientemente sensible a las concentraciones de químicos y otros constituyentes que integra el efecto combinado de éstos y proporciona una indicación de cuán desfavorable es el estado del agua al hombre y a la vida acuática.
- Además, debe permitir evaluar los cambios en la calidad del agua.

# OBJETIVOS

- Desarrollar un procedimiento para calcular un Índice de la Calidad del Agua (ICA) para los ríos en Puerto Rico.
- Evaluar las bondades y limitaciones del procedimiento.
- Estudiar algunas aplicaciones del ICA.

# METODOLOGÍA



# Trabajos Previos

- ICAs desarrollados anteriormente
  - USA (1970)
  - Inglaterra (1989)
  - Oregón (2001)
  - Nueva Zelanda (2001)
  - Brasil (2007)
- Estas metodologías están basadas en los requerimientos y necesidades únicas para el lugar donde fueron desarrolladas.
- No son transferibles.

# Índices de Calidad de Agua para Ríos

ICA	Ecuación
<b>Promedio Aritmético Pesado</b>	$I = \sum_{i=1}^9 w_i q_i$
<b>Promedio Geométrico Pesado</b>	$I = \prod_{i=1}^9 q_i^{w_i}$
<b>Raíz Cuadrada del Promedio Armónico No Pesado</b>	$ICA = \left( \prod_{i=1}^n S_i \right)^{1/n}$
<b>Operador Mínimo</b>	$I = \min(S_1, S_2, S_3, \dots, S_N)$
<b>Índice de <u>Harkins</u></b>	$S_n = \sum_{i=1}^p \frac{(R_m - R_{ic})^2}{Var_i}$
<b>Promedio Aritmético No Pesado</b>	$ICA = \left( \prod_{i=1}^n S_i \right)^{1/n}$
<b>ICAST</b>	$ICA = \left( 1 - N + \sum_{i=1}^n S_i^{-2.5} \right)^{-0.4}$

# Promedio Pesado

$$I = \prod_{i=1}^9 q_i^{w_i}$$

- Basado en el promedio geométrico pesado de las concentraciones de los constituyentes seleccionados.

---

## Constituyentes

---

Oxígeno Disuelto

BOD<sub>5</sub>

Turbidez

Sólidos Totales

Nitratos

Fosfatos

pH

Temperatura

Coliformes Fecales

---

# Metodología

- Selección de los Constituyentes
  - Utilizando el Método DELPHI
  - Primera Ronda de cuestionarios
- Determinar las Curvas Funcionales
  - Utilizando el Método DELPHI
  - Segunda Ronda de Cuestionarios
- Seleccionar el Método de Agregación
  - Considerando 3 metodologías

# Selección de los Constituyentes

- Determinar el uso del agua (Abasto de Agua Potable en nuestro caso).
- Inicialmente se consideraron 56 constituyentes.
  - Representan características químicas, física y biológicas.
- La mayoría de los constituyentes seleccionados inicialmente están incluidos en el Acuerdo Cooperativo que tiene el USGS con el gobierno de Puerto Rico.

# Primera Ronda de Cuestionarios

Parameters	USGS	Classification			Rate
		Do not include	Undecided	Include	
Acidity					
Alkalinity	Yes				
Aluminum	Yes				
Ammonia	Yes				
Ammonia Nitrogen	Yes				
Arsenic	Yes				
Barium	Yes				
Bicarbonate	Yes				
Biochemical Oxygen Demand (BOD) (5-day)	Yes				
Boron	Yes				
Cadmium	Yes				
Calcium	Yes				
Carbon Chloroform Extract					
Carbonate	Yes				
Chemical Oxygen Demand	Yes				
Chloride	Yes				
Coliform Organisms					
Color	Yes				
Conductivity					
Copper	Yes				
Cyanide	Yes				

# Selección de los Constituyentes

- Se encuestó a un grupo de 76 expertos en la calidad del agua.
  - Evaluaron los constituyentes utilizando una escala de 1 (importancia relativamente baja) al 5 (importancia relativamente alta).
- De los 56 constituyentes iniciales sólo se seleccionaron aquellos que obtuvieron un valor promedio sobre 2.0.
  - 26 constituyentes pasaron la primera etapa de selección.

# Los 26 constituyentes Seleccionados

No.	Constituyente	Promedio	No.	Constituyente	Promedio
1	Coliformes Fecales	4.61	14	Estreptococcus Fecal	2.72
2	Oxígeno Disuelto (OD)	4.33	15	Carbón Orgánico Total	2.72
3	pH	4.11	16	Plomo	2.69
4	Turbidez	4.11	17	Alcalinidad	2.67
5	Nitratos + Nitritos	3.75	18	Amonio	2.67
6	Fósforo Total	3.33	19	Conductancia Específica	2.56
7	DBO <sub>5</sub>	3.28	20	Temperatura	2.56
8	Nitrógeno Orgánico	3.17	21	Manganeso	2.47
9	Nitrógeno de Amonio	3.06	22	DQO	2.39
10	Coliformes Totales	3.00	23	Fosfato	2.33
11	Fósforo	2.94	24	Arsénico	2.11
12	Sólidos Suspendidos	2.94	25	Sólidos Disueltos	2.06
13	Mercurio	2.89	26	Pesticidas	2.03



# Selección de los Constituyentes

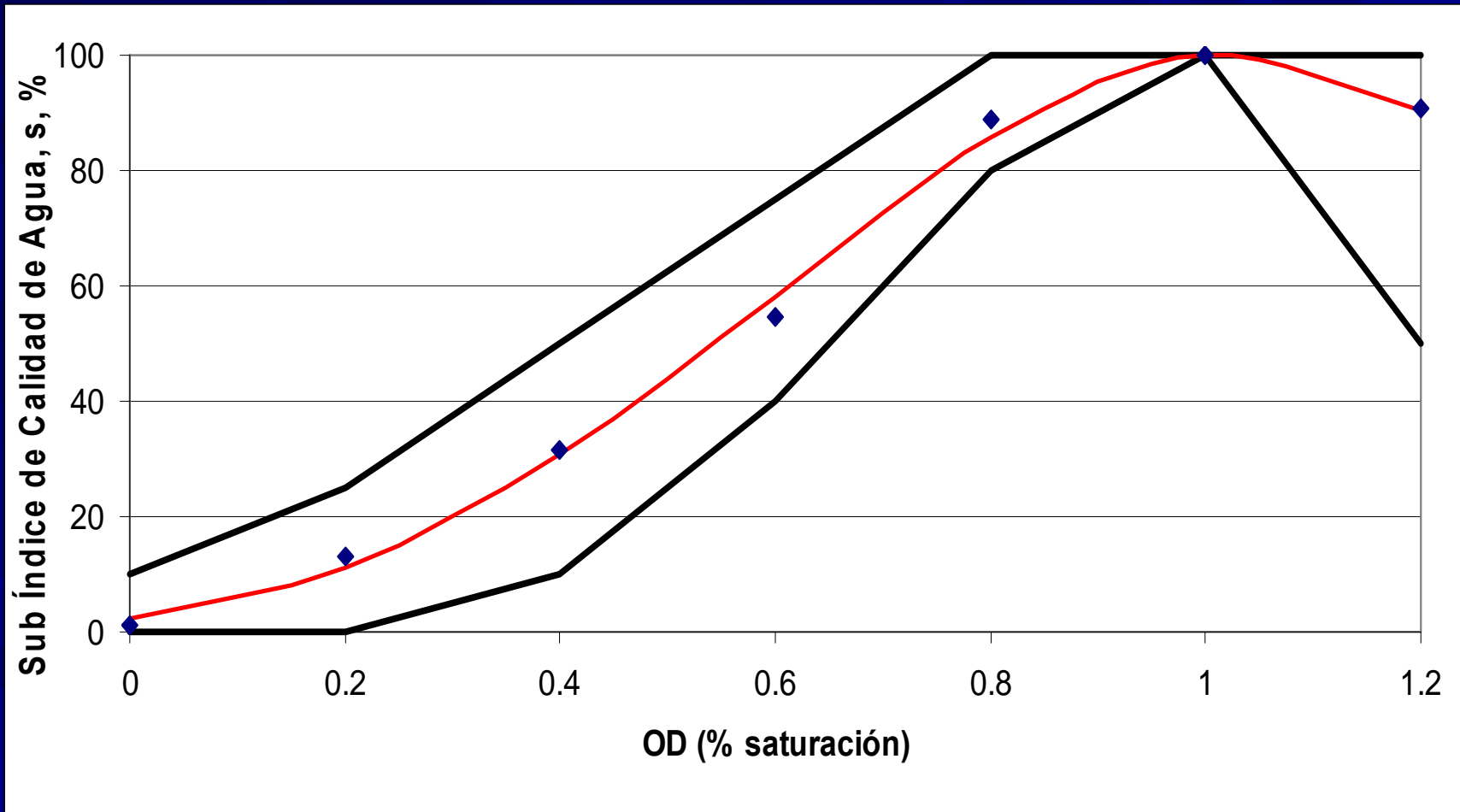
- Los 26 constituyentes seleccionados son sometidos a un análisis más detallado.
- Se eliminaron ...
  - Los constituyentes ambiguos (por ejemplo, de las varias especies de Fósforo se seleccionó la de mayor puntaje).
  - Aquellos para los cuales no hay datos publicados (no incluidos en el A.C.-USGS).
- La lista se redujo a 11 constituyentes.

# Constituyentes Finalistas

Constituyentes del ICA	Tipo de Parámetro		
	Físico	Químico	Biológico
Coliformes Fecales			X
Oxígeno Disuelto (OD)		X	
pH		X	
Nitratos		X	
Fósforo Total		X	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )			X
Nitrógeno de Amoniac		X	
Sedimentos Suspendidos	X		
Mercurio		X	
Plomo		X	
Temperatura	X		

# Desarrollo de Curvas Funcionales

(Ejemplo de lo que es una curva funcional)



# Desarrollo de Curvas Funcionales

- Sólo se consideraron los 11 constituyentes finalistas en la primera ronda.
- Sólo participaron los expertos que contestaron en la primera ronda.
- La curvas funcionales presentan la variación en la calidad del agua a medida que aumenta la concentración del constituyente.

# Desarrollo de Curvas Funcionales

- La calidad del agua se expresa en una escala de 0% a 100%.
- Utilizando estas curvas funcionales se determinan los subíndices de calidad del agua de cada constituyente a ser utilizados durante el proceso de agregación.
  - Los subíndices representan las características particulares de un constituyente.

# Segunda Ronda de Cuestionarios

pH	Nivel de Calidad del Agua
2	
4	
6	
8	
10	
12	
14	

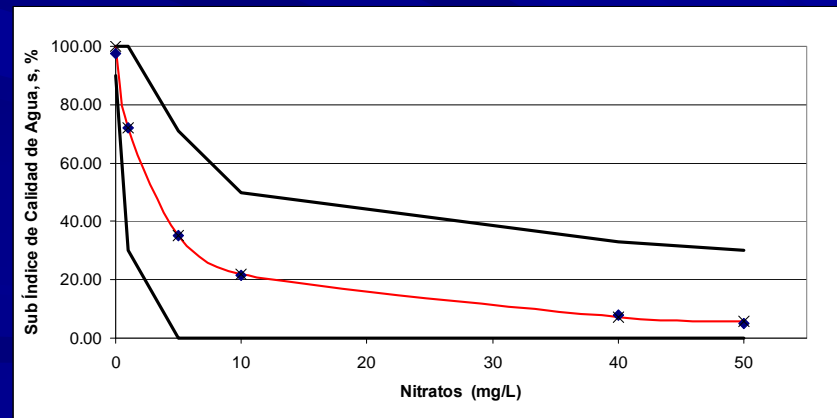
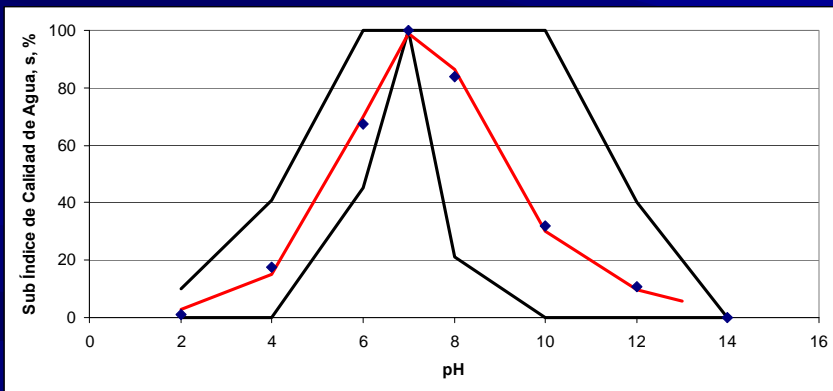
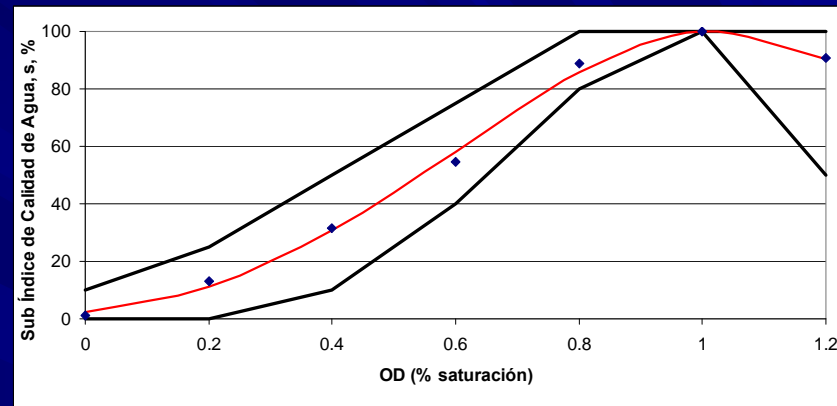
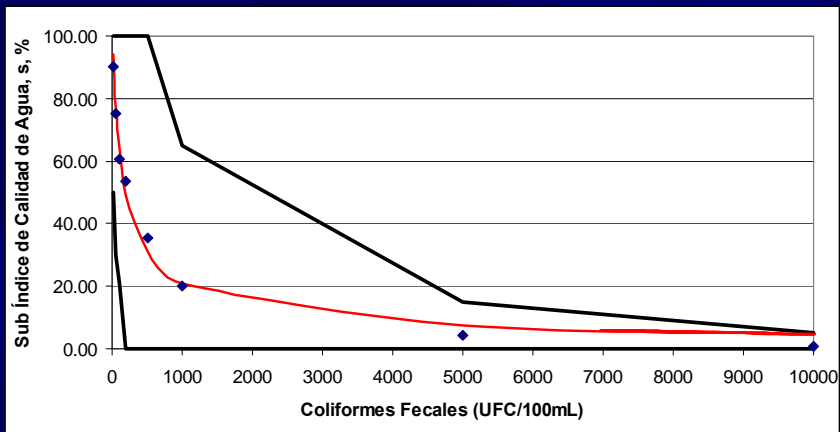
- Utilizando como referencia los estándares de calidad de agua de la EPA y la JCA.

Classification	WQI Level (%)
Excellent	91 – 100
Good	71 – 90
Average	41 – 70
Bad	21 – 40
Very Poor	0 – 20

El encuestado debe clasificar cada valor del constituyente de acuerdo a la escala provista.

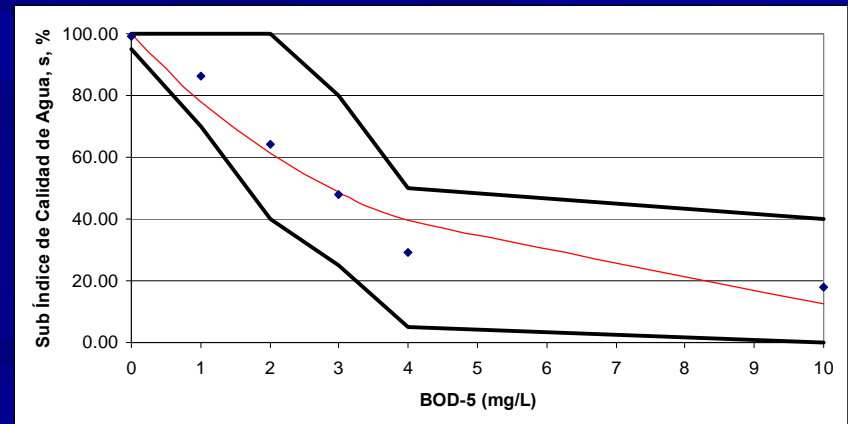
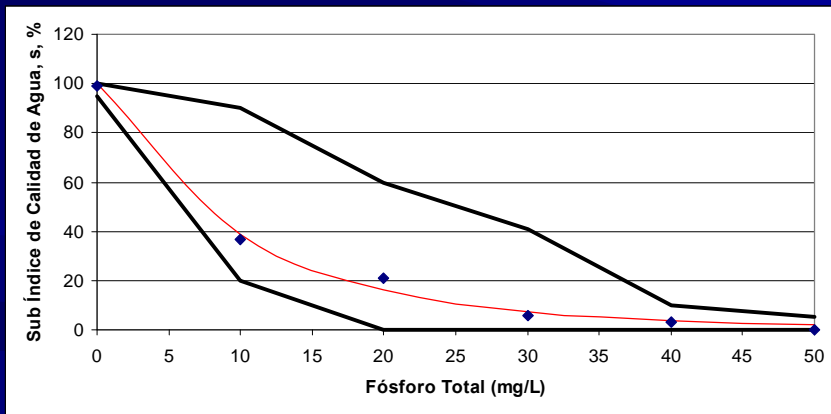
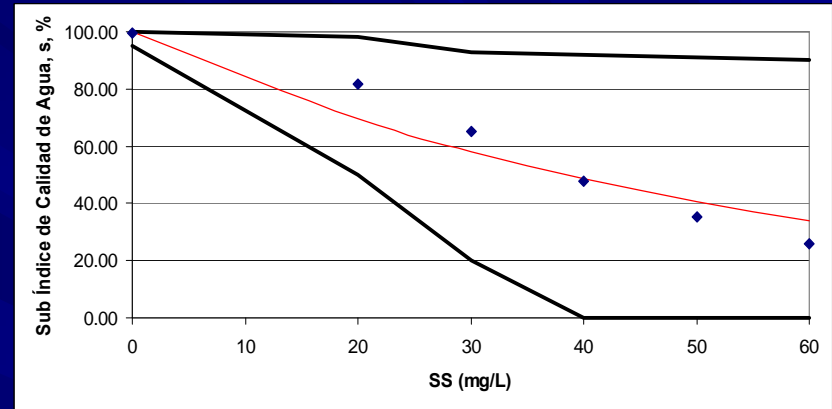
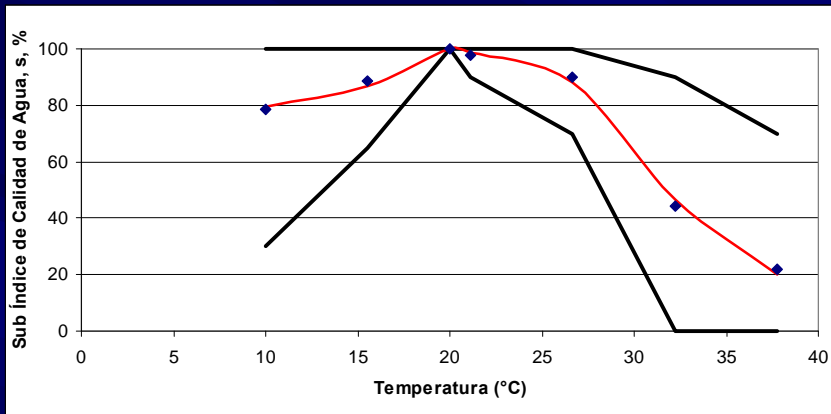
# Curvas Funcionales

(resultados de la 2<sup>da</sup> encuesta)



# Curvas Funcionales

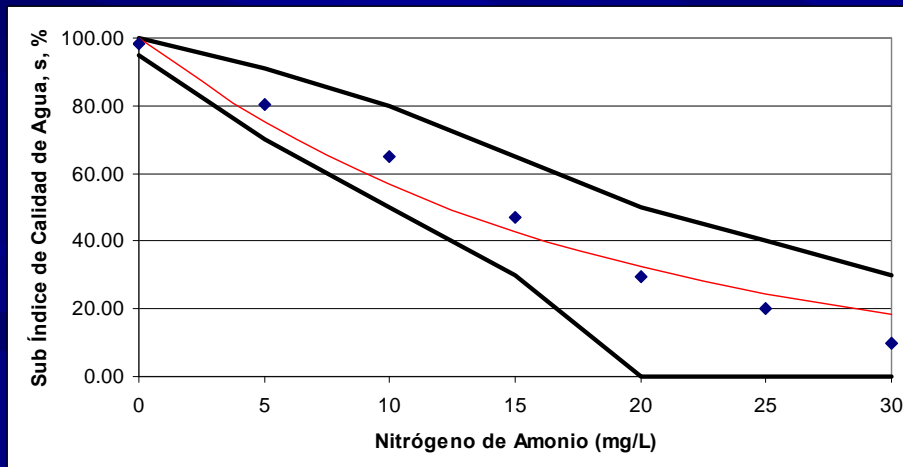
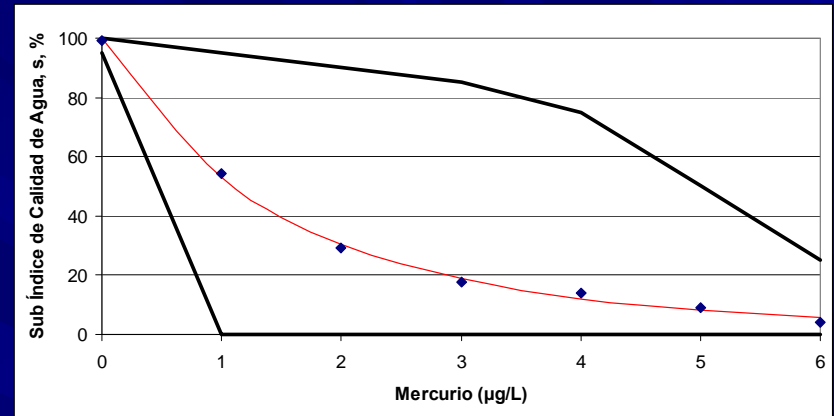
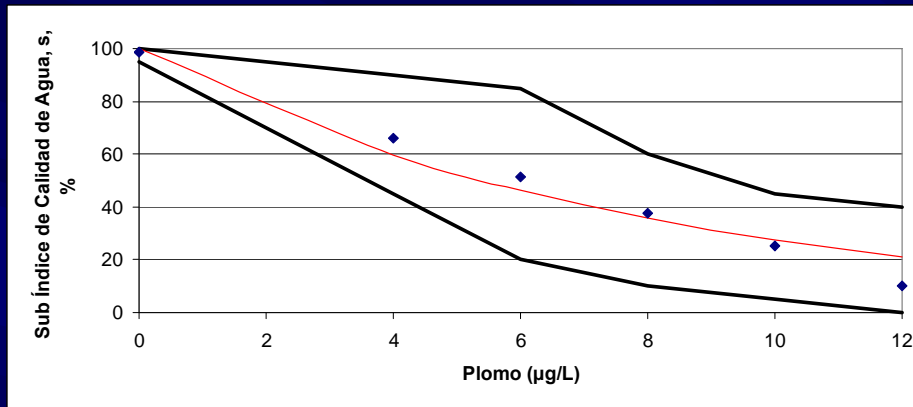
(resultados de la 2<sup>da</sup> encuesta)

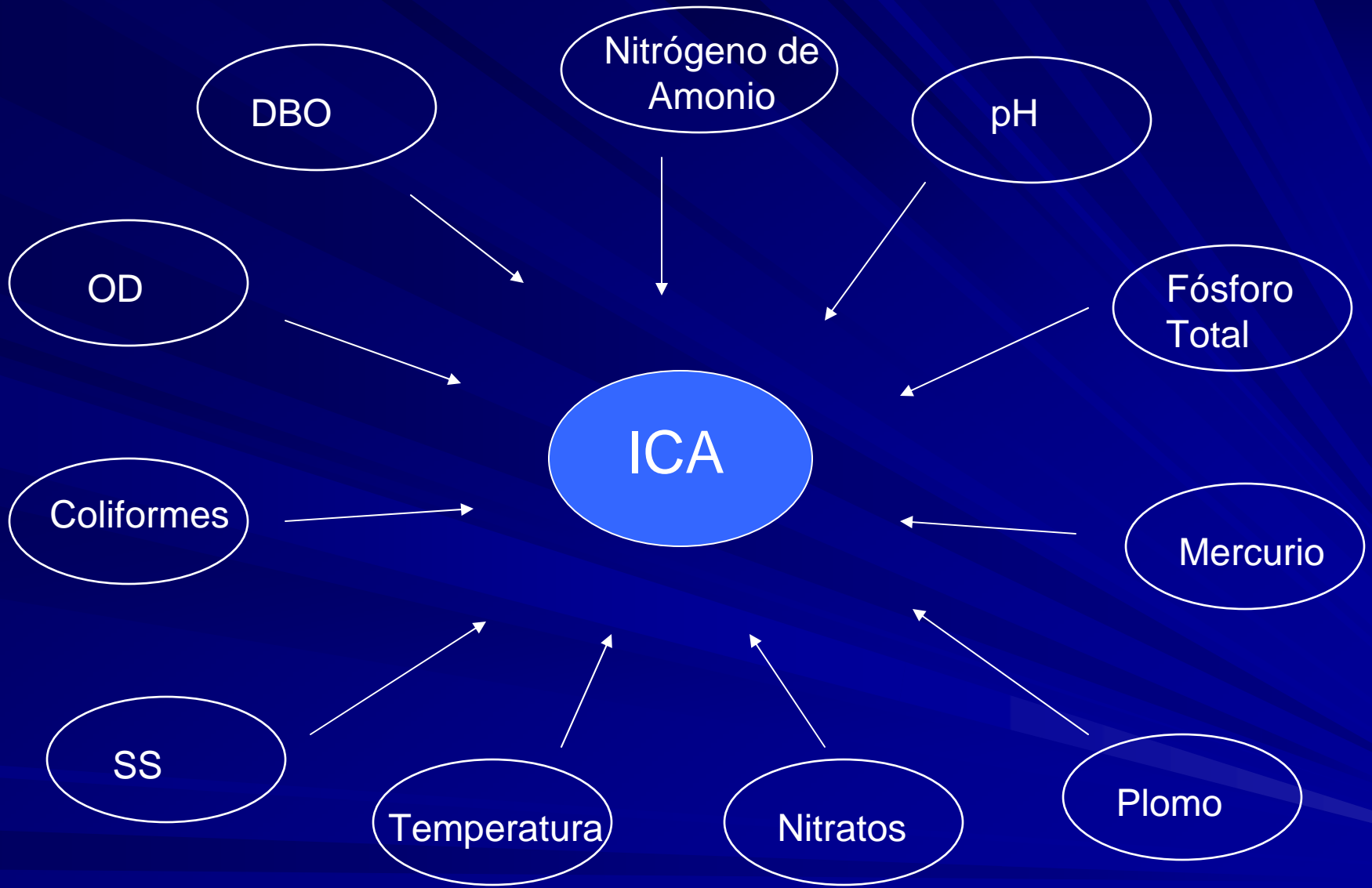




# Curvas Funcionales

(resultados de la 2<sup>da</sup> encuesta)





AGREGACIÓN

# Agregación de Constituyentes

- Es una de las partes más importantes en el cálculo del índice de la calidad de agua.
- Es de esta manera que se puede obtener un valor que integre la información de constituyentes con unidades de medición diferentes.
- Para determinar la metodología adecuada se consideraron tres ecuaciones obtenidas de estudios previos.

# Metodologías Evaluadas

Metodología	Ecuación (ICA)
<p>ICA-Multiplicativo No Pesado (Promedio Geométrico) <b>ICAMNP</b> <i>Landwehr y Deininger (1976)</i></p>	$ICA = \left( \prod_{i=1}^n S_i \right)^{1/n}$
<p>Raíz Cuadrada del Promedio Armónico No Pesado (Oregón) <b>ICAO</b> <i>Cute (2001)</i></p>	$ICA = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^2}}}$
<p><b>ICAST</b> <i>Swamee y Tyagi (2000)</i></p>	$ICA = \left( 1 - N + \sum_{i=1}^n S_i^{-2.5} \right)^{-0.4}$

# Selección del Método de Agregación

- Se realizó un análisis de comparación entre las tres metodologías seleccionadas.
- El propósito fue determinar qué ecuación resultaba en un ICA más representativo según las condiciones evaluadas.
- La ecuación debe mostrar mayor sensibilidad a cambios en las variables.

# Selección del Método de Agregación

- Utilizando datos de calidad de agua obtenidos del estudio de Swamee y Tyagi (2000) se calculó el ICA .
- La calidad del agua en la muestra no era muy buena.
- Resultados:
  - ICAMNP = 86.4%
  - ICAO = 85.4%
  - ICAST = 50.5%

# Selección del Método

- ICAMNP y ICAO resultaron en valores representativos de buena calidad mientras ICAST resultó con una calidad inferior.
- Esto se debe a que las ecuaciones del ICAMNP y el ICAO confrontan problemas de ambigüedad o de eclipsamiento.

# Selección del Método

## ■ Eclipzamiento

- Es cuando en el cálculo del ICA un subíndice muestra un valor de calidad pobre pero en el resultado final el ICA no refleja esa calidad pobre.



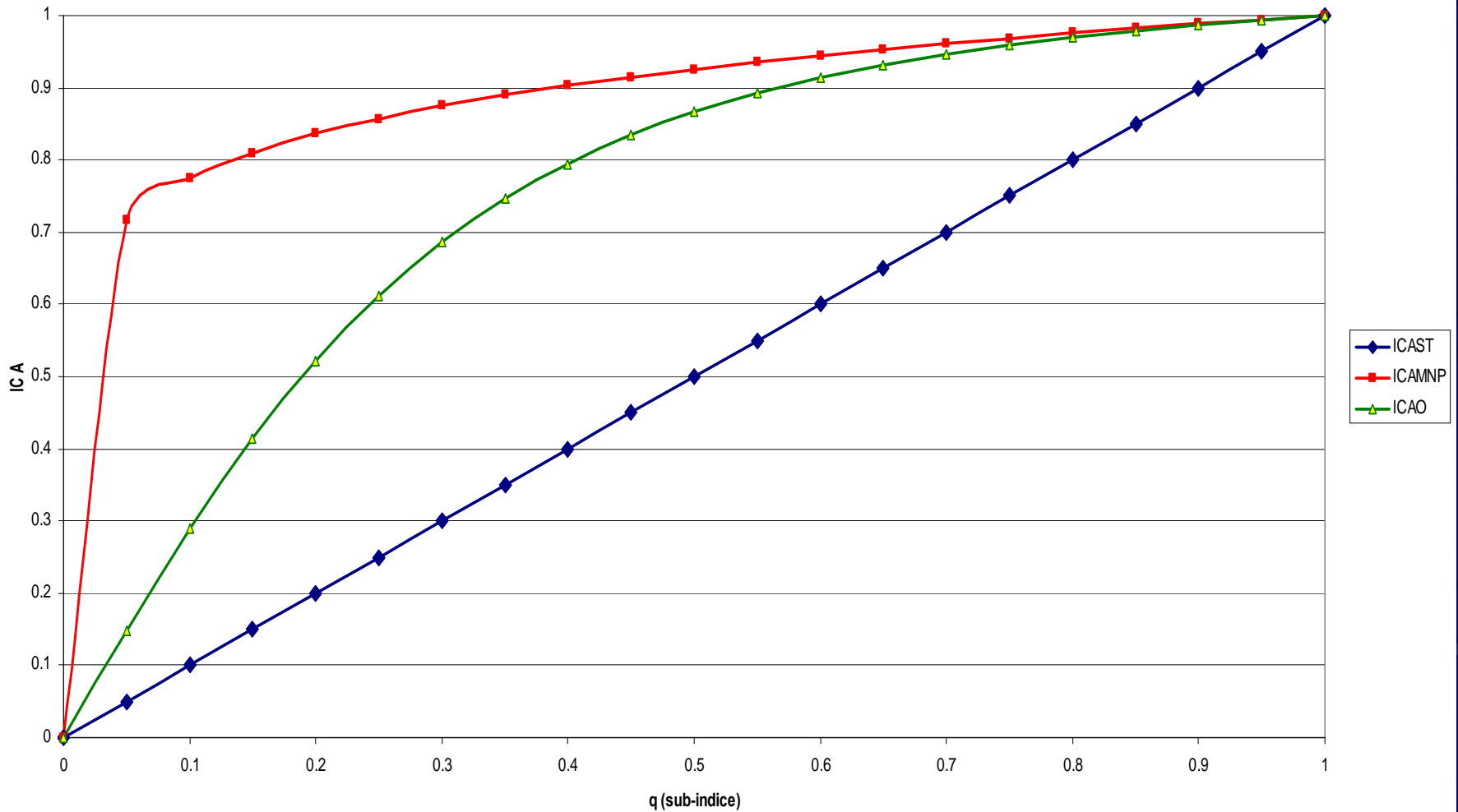
# Selección del Método

## ■ Ambigüedad

- Sucede cuando la muestra de agua presenta una calidad aceptable y el valor obtenido del ICA es inaceptable.
- Los constituyentes de buena calidad no deben influenciar el resultado final.
- Hace el método sensible al número de variables.

# Selección del Método

(Variación del ICA según varía el subíndice de calidad de agua)



# Método Seleccionado

- Ecuación de Swamee y Tyagi (ICAST).
- Ésta no muestra tener comportamientos que produzcan resultados ambiguos o con eclipsamiento.
- La ecuación no está prejuiciada por ningún constituyente en específico.
- No depende del número de constituyentes.

$$ICA = \left( 1 - N + \sum_{i=1}^N s_i^{-2.5} \right)^{-0.4}$$

# Subíndices de la Calidad del Agua

- Tenemos dos formas de obtener los valores de los subíndices a utilizar en el proceso de agregación.
  - Método Gráfico (Usando curvas funcionales)
  - Ecuaciones de las curvas funcionales.
- Mediante un algoritmo de optimización se determinaron los valores óptimos para cada parámetros de las ecuaciones de las curvas funcionales de los subíndices.

# Ecuaciones para los Subíndices

- Se observó dos tipos diferentes de comportamiento en las ecuaciones de los subíndices de calidad de agua
- Unimodal
  - Aquellos que mostraron un comportamiento ascendente hasta llegar a un máximo para luego descender.
- Disminución uniforme
  - Aquellos que comienzan con valores altos y luego van descendiendo gradualmente hasta llegar a valores bajos.

# Ecuaciones para los Subíndices

Clasificación de Subíndice	Ecuación
Disminución Uniforme	$s = \left(1 + \frac{q}{q_c}\right)^{-m}$
Unimodal	$s = \frac{pr + (n + p)(1 - r)\left(\frac{q}{q^*}\right)^n}{p + n(1 - r)\left(\frac{q}{q^*}\right)^{n+p}}$

Donde  $s$  = valor del subíndice;  $q$  = variable de calidad;  $q_c$  = valor característico de  $q$ ;  $q^*$  = valor óptimo de  $q$ ;  $m, n, p$  = exponentes de valor positivo; y  $r$  = subíndice para  $q = 0$ .

# Análisis de Sensibilidad

- Ventajas del método seleccionado:
  - No está influenciado por ningún constituyente en particular.
  - No es necesario tener datos para todos los constituyentes para obtener un valor del ICA.
- Para comprobar ambas ventajas se realizaron varios análisis de sensibilidad en la ecuación del ICA.
  - Se utilizó el método de perturbación

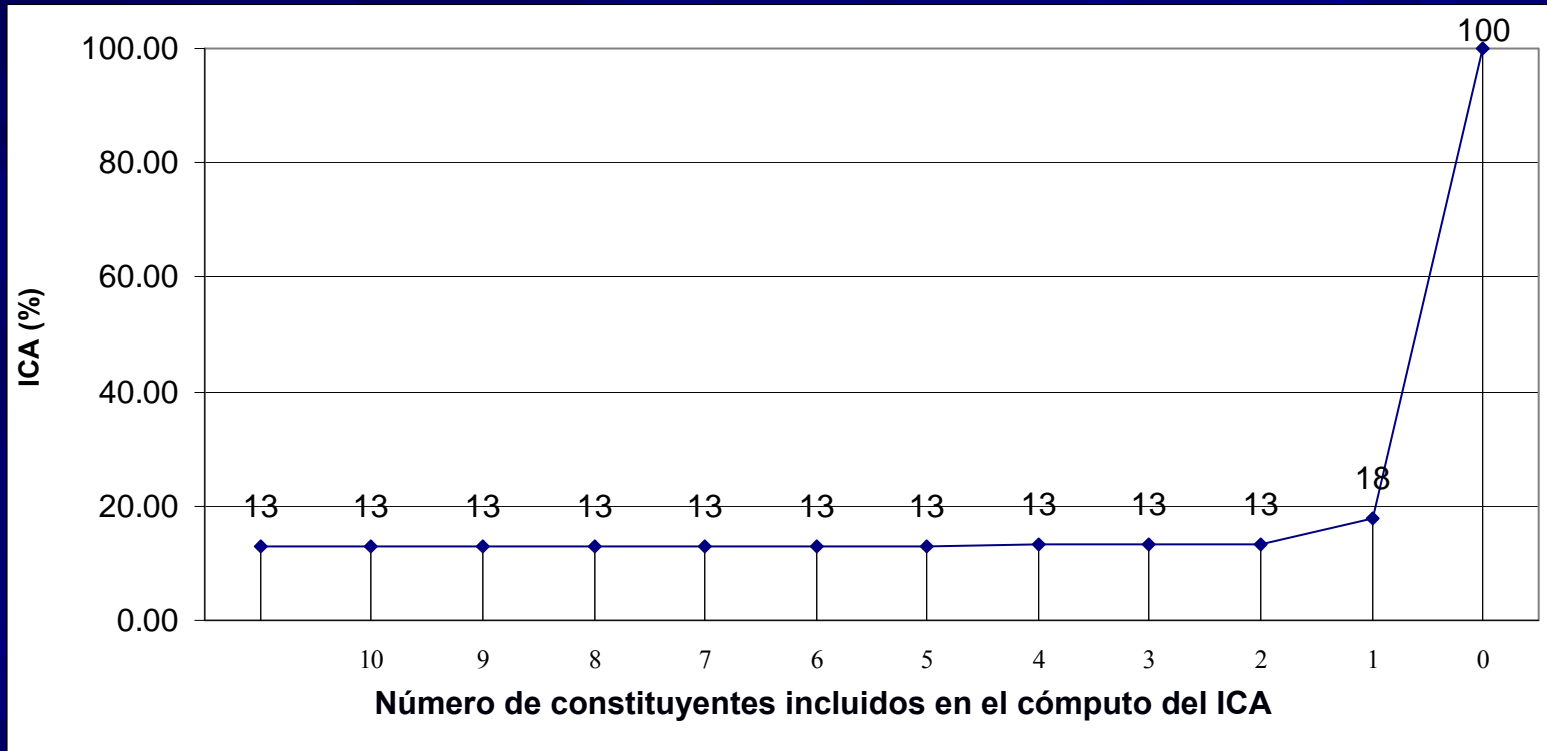
$$S_r = \frac{\Delta ICA}{\Delta ConcConst} * \frac{ConcConst}{ICA}$$

# Sensibilidad Relativa

Constituyente	$S_r$
Plomo	-0.6005
Nitratos	-0.6002
DBO	-0.0241
Coliformes Fecales	-0.0181
OD	0.0090
pH	0.0086
Fosfatos	-0.0016
Temperatura	-0.0011
Sedimentos Suspendidos	-0.00074
Nitrógeno de Amonio	-0.00053
Mercurio	-0.00037



# Variación del ICA con respecto al número de constituyentes



Constituyentes ordenados de menor a mayor sensibilidad

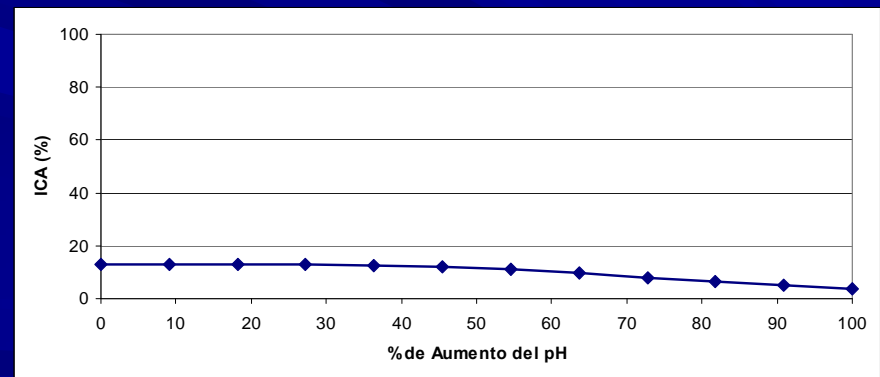
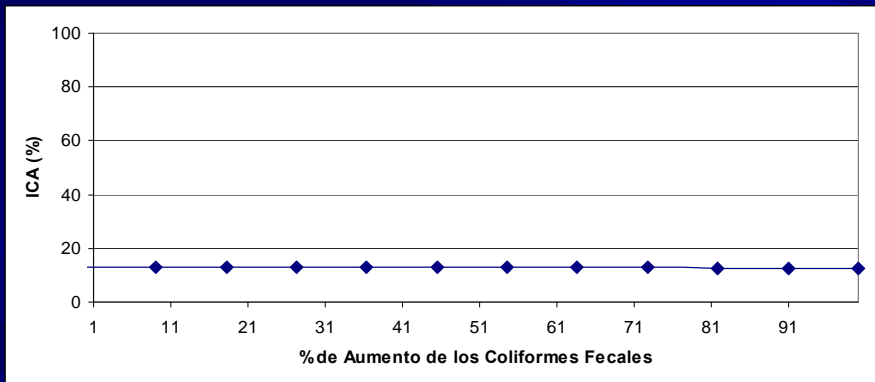
# Análisis de Sensibilidad

- Cinco constituyentes aparentan tener influencia sobre el valor del ICA
- Utilizando los estándares de calidad, éstos muestran los subíndices más bajos
- La metodología seleccionada no muestra estar prejuicida por ningún constituyente en particular
- La ecuación sólo estará influenciada por el valor del subíndice

Constituyente	$q_{est\acute{a}ndar}$	$S_{est\acute{a}ndar}$	$S_r$
Plomo ( $\mu\text{g/L}$ ) ←	15	0.18	-0.6005
Nitratos ( $\text{mg/L}$ ) ←	10	0.18	-6.002
DBO ( $\text{mg/L}$ ) ←	3	0.5	-0.0241
Coliformes (UCF) ←	200	0.5	-0.0181
OD (Estandar es 5 $\text{mg/L}$ ), % ←	0.55	0.52	0.0090
pH	7	1	0.0086
Fosfatos ( $\text{mg/L}$ )	1	0.83	-0.0016
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	20	1	-0.0011
Sedimentos Susp ( $\text{mg/L}$ )	5	0.91	-0.00074
Nitrógeno de Amonio ( $\text{mg/L}$ )	1	0.93	-0.00053
Mercurio ( $\mu\text{g/L}$ )	0.05	0.95	-0.00037

# Análisis de Sensibilidad

- Un segundo análisis fue realizado para demostrar que el ICA no está prejuiciado por ningún constituyente en particular.
- En este se consideraron los 11 constituyentes manteniendo a 10 con el valor constante y modificando la concentración de uno de ellos.



# Escala de Clasificación

- Está basada en los estándares de calidad de agua establecido por:
  - EPA en los *Estándares Nacionales Primarios para Agua Potable*.
  - JCA en el *Reglamento de Estándares de Calidad de Agua de Puerto Rico*.
- Utilizando los estándares de calidad se estableció que el  $ICA_{\text{Estándar}}$  es de 13%.

# Escala de Clasificación

Clasificación o Estado	Rango	Color
Bueno	90 – 100	Verde
Moderadamente Bueno	71 – 89	Azul
Promedio	31 – 70	Amarillo
Estado de Alerta	15 – 30	Naranja
Pobre	0 – 15	Rojo

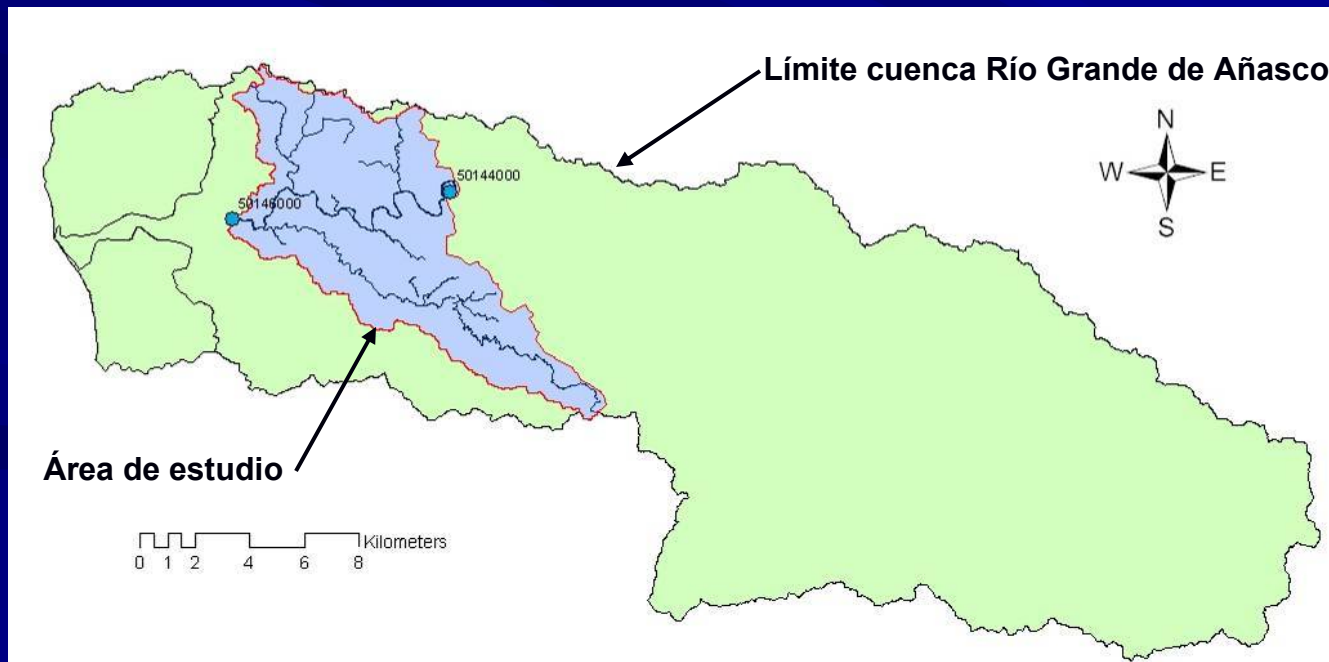
# APLICACIONES

# Aplicaciones

- Variación del ICA para años húmedos
- Variación del ICA para años promedios
- Variación del ICA para años secos
- Variación del ICA en tiempo
  - USGS 50144000 – RIO GRANDE DE ANASCO NR SAN SEBASTIAN, PR
  - USGS 50146000 –RIO GRANDE DE ANASCO AT ANASCO, PR
- Variación del ICA en espacio
- Cómputo del ICA para varias cuencas de Puerto Rico

# Área de Estudio

- Ubicada entre las estaciones del USGS
  - USGS 50144000 – RIO GRANDE DE ANASCO NR SAN SEBASTIAN, PR
  - USGS 50146000 –RIO GRANDE DE ANASCO AT ANASCO, PR
- Existe una toma de agua potable en el río Humatas y una toma propuesta para el río Casey



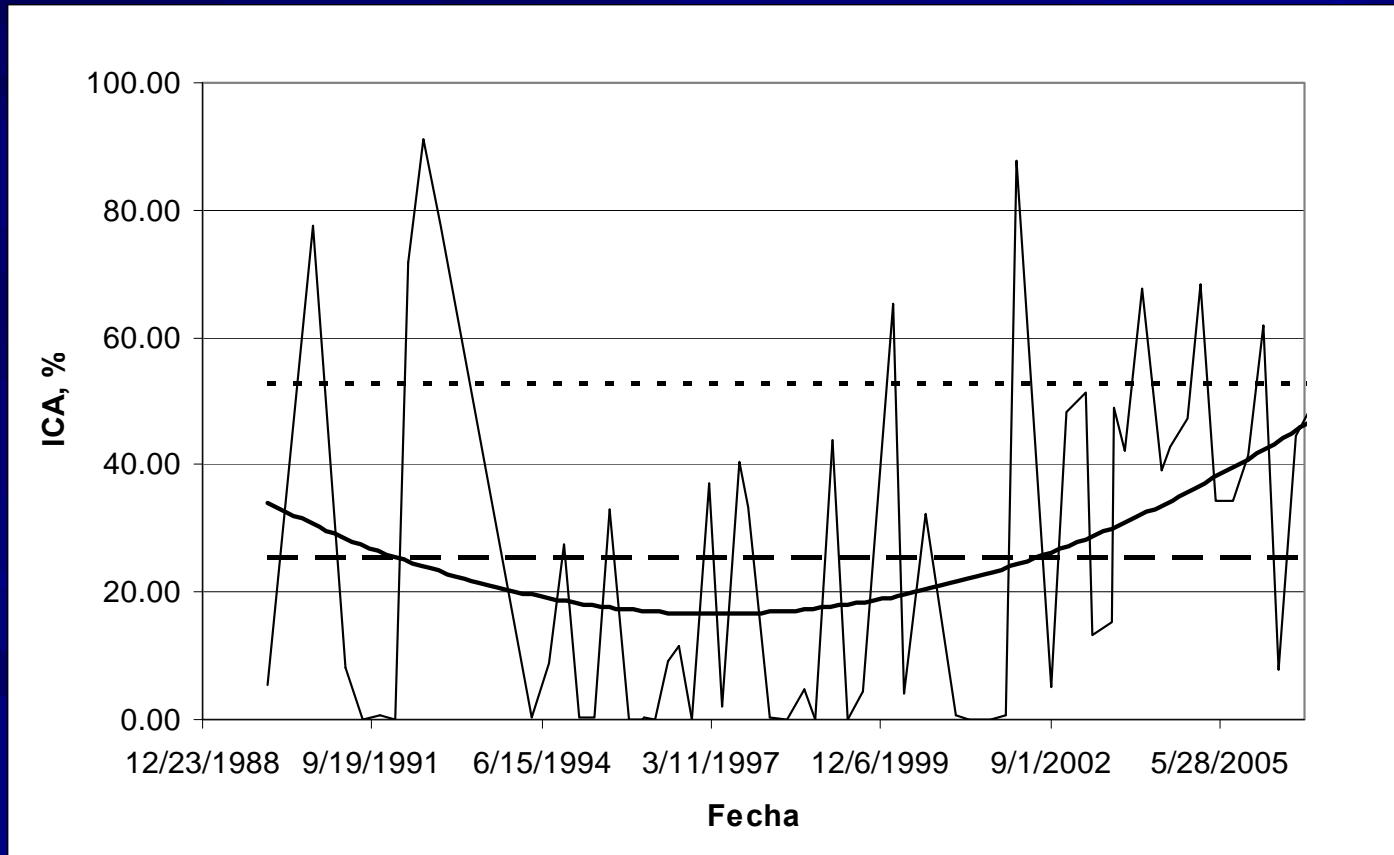


# Variación del ICA en Tiempo

- El objetivo fue determinar la variación en tiempo del ICA aguas arriba y aguas abajo del tramo en estudio.
- Son valores puntuales representativos del lugar donde se tomaron las muestras.
- El análisis muestra que ambas estaciones se encuentran en estado de alerta.
- Se determinó que para años húmedos el ICA es más alto que para años secos.

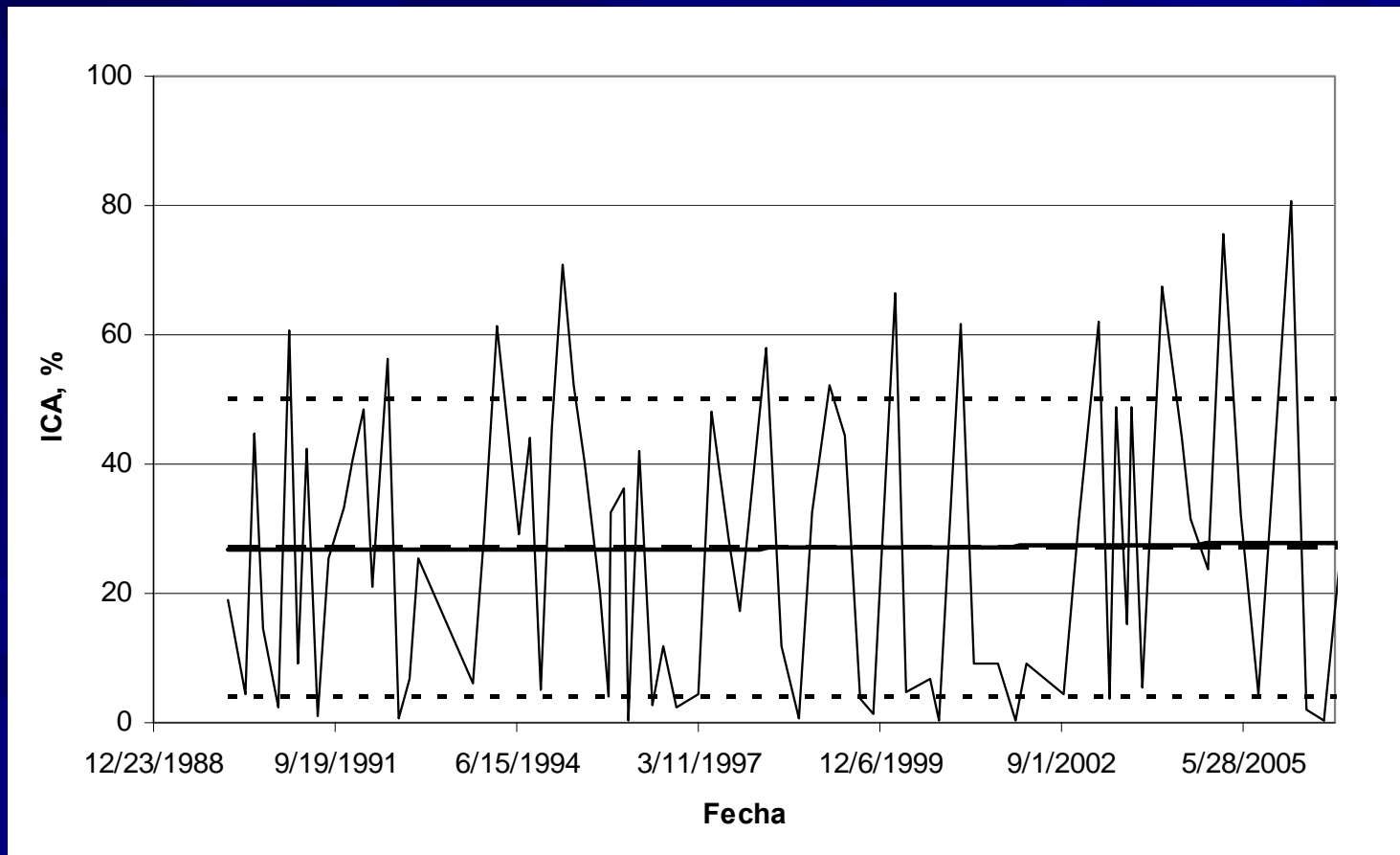
# Variación del ICA en Tiempo

■ USGS 50144000 – Cerca de San Sebastián



# Variación del ICA en Tiempo

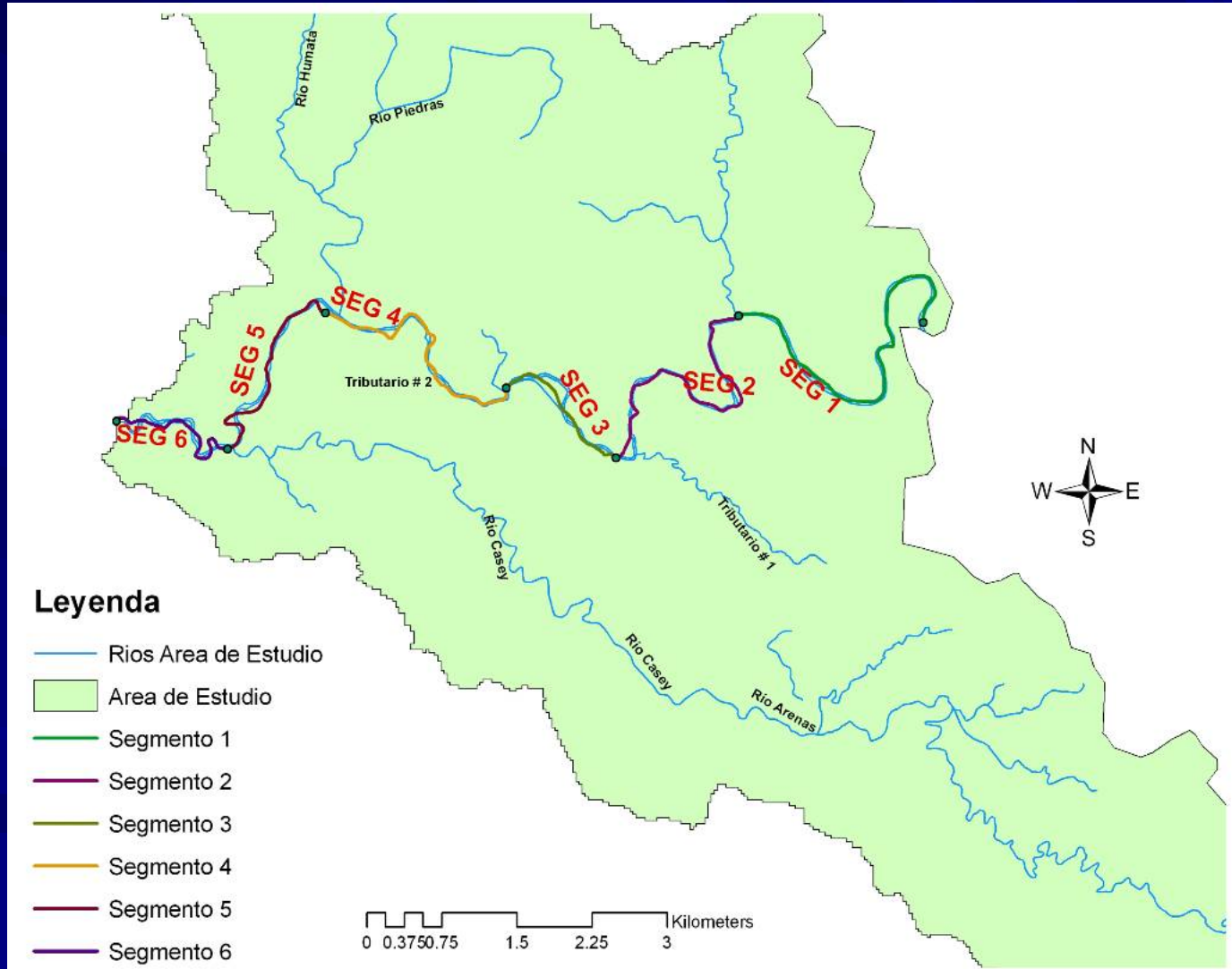
## ■ USGS 50146000 – Cerca de Añasco



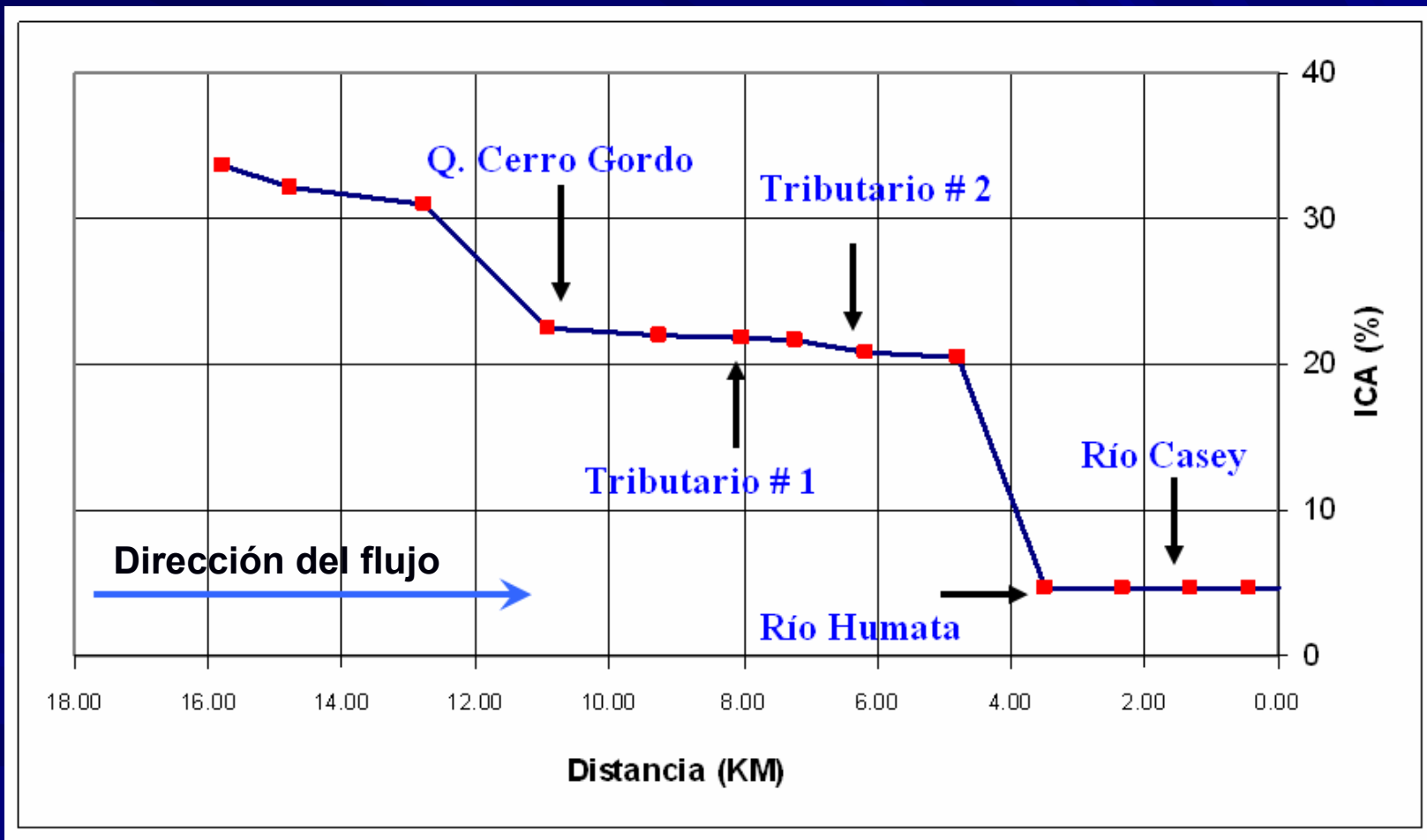
# Variación del ICA en Espacio

- El objetivo fue visualizar la variación de la calidad del agua en espacio a través de un tramo o segmento del Río Grande de Añasco.
- Se utilizó un programa de calidad de agua capaz de simular el transporte de los constituyentes (EPA-QUAL2E).
- El análisis incluye el transporte y variación de los constituyentes de la calidad del agua en una dimensión e independiente del tiempo.

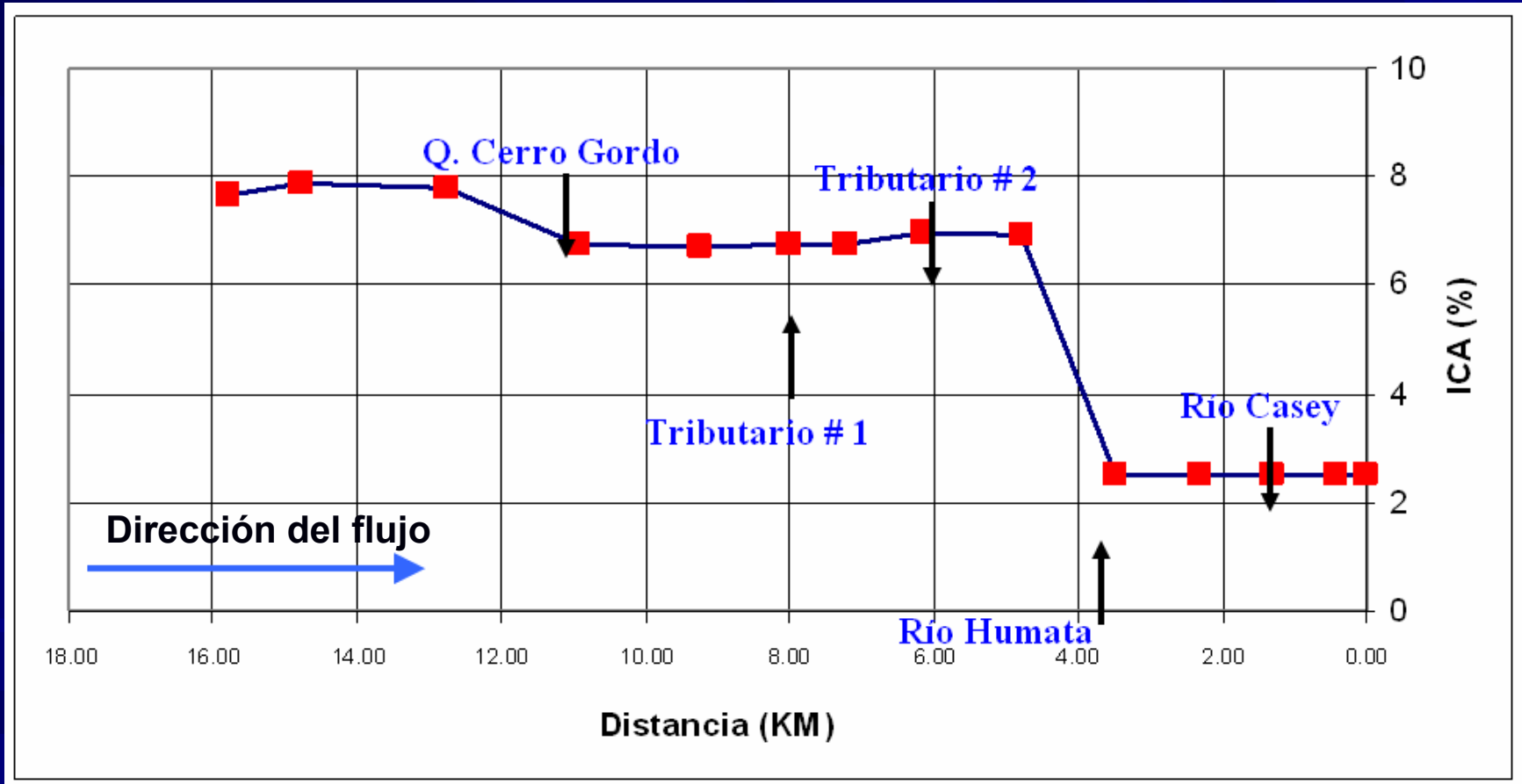
# Segmentación del Tramo en Estudio



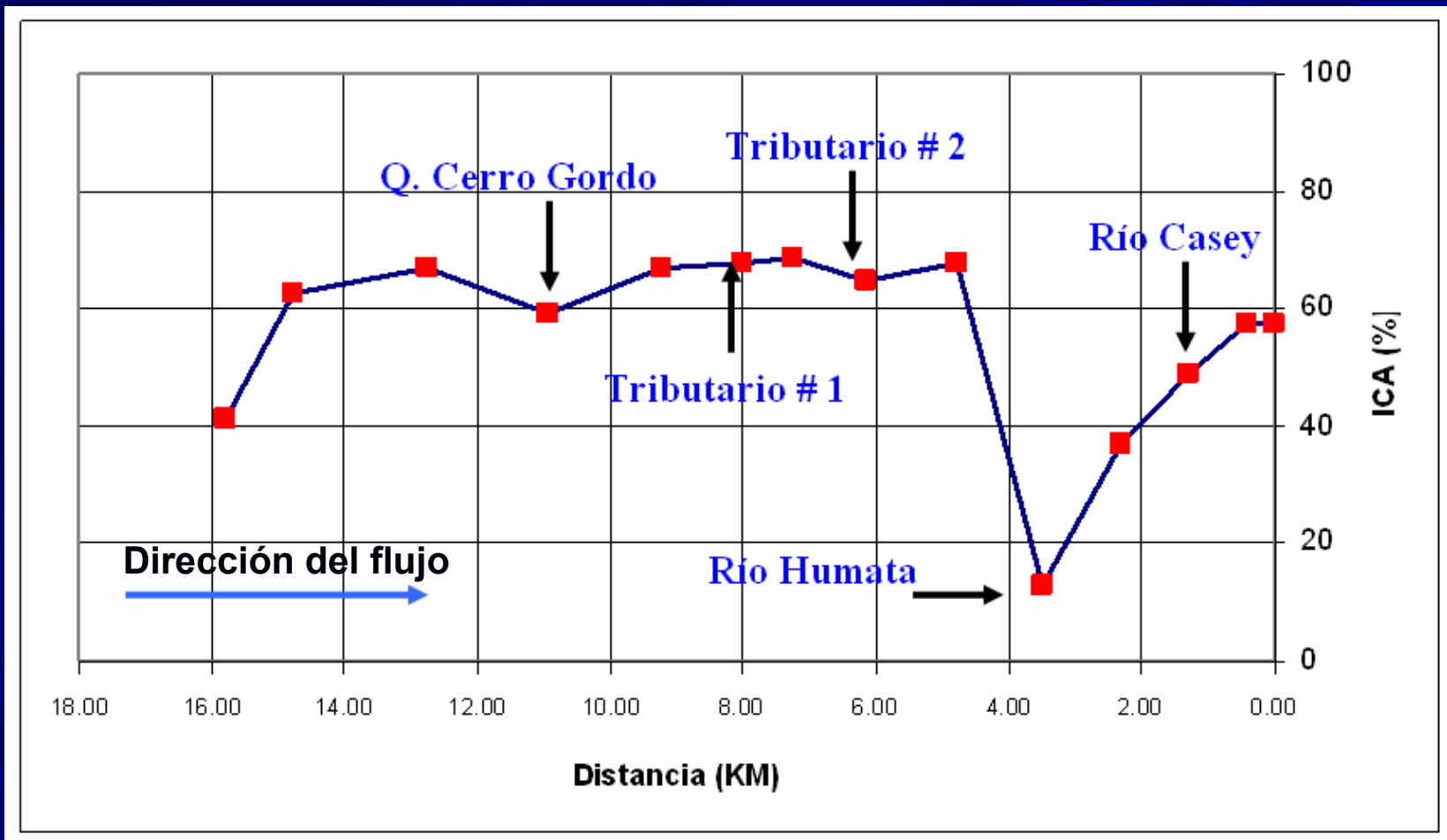
# Condición Húmeda



# Condición Promedio



# Condición Seco



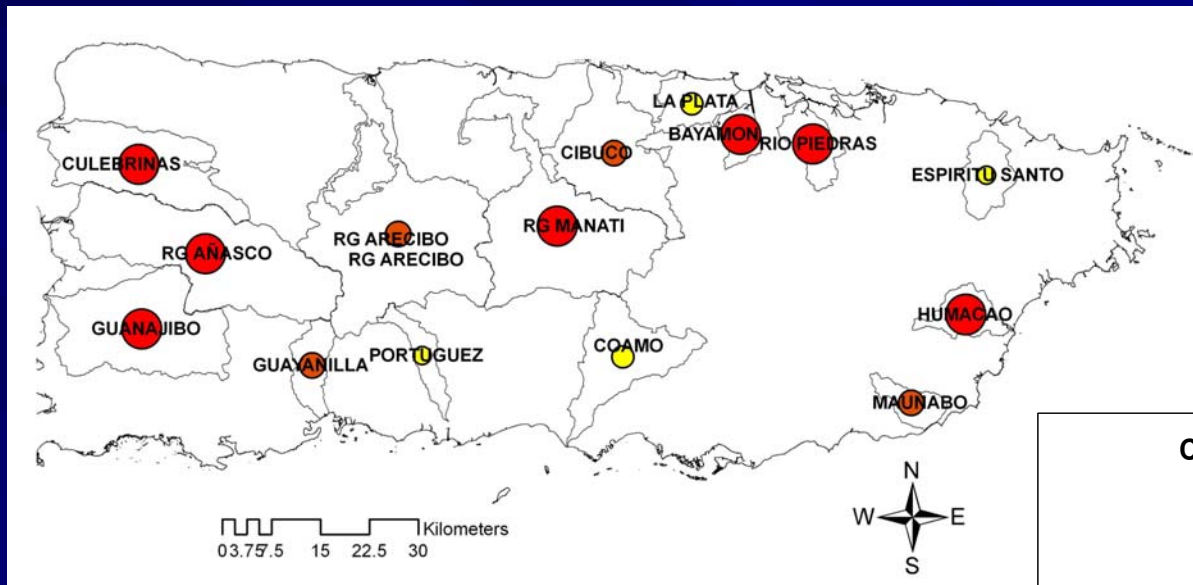


# Cómputo del ICA para varios ríos en Puerto Rico

<b>Estación USGS</b>	<b>Cuerpo de agua</b>	<b>Fecha de muestreo</b>	<b>ICA</b>
<i>Años 2008</i>			
50106500	Río Coamo	11-agosto-2008	33.56
50138000	Río Guanajibo	12-agosto-2008	3.70
50124700	Río Guayanilla	13-agosto-2008	33.43
50039500	Río Cibuco	14-agosto-2008	21.45
50116200	Río Portugués	14-agosto-2008	52.61
50146000	RG Añasco	19-agosto-2008	3.77
50149100	Río Culebrinas	20-agosto-2008	0.33
50046000	Río La Plata	25-agosto-2008	36.76
50063800	Río Espíritu Santo	6-agosto-2008	51.15
50047530	Río Bayamón	7-agosto-2008	0.99
50082000	Río Humacao	7-agosto-2008	0.49
50029000	RG Arecibo	7-agosto-2008	27.01
50038100	RG Manatí	7-agosto-2008	3.63
50049100	Río Piedras	8-agosto-2008	0.27
50091000	Río Maunabo	8-agosto-2008	26.95
<i>Años 2005</i>			
50072500	Río Fajardo	19-septiembre-2005	0.33
50086500	Río Guayanés	20-septiembre-2005	4.66
<i>Años 2004</i>			
50129700	Río Loco	24-agosto-2004	30.03
50091800	Río Chico	25-agosto-2004	6.62

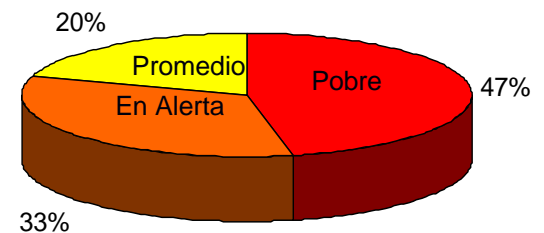
# ICA en Puerto Rico

Agosto 2008



Clasificación o Estado	Rango	Color
Bueno	90 – 100	Green
Moderadamente Bueno	71 – 89	Blue
Promedio	31 – 70	Yellow
Estado de Alerta	15 – 30	Orange
Pobre	0 – 15	Red

Calidad del agua en las cuencas estudiadas - Años 2008



# Conclusiones

- Se ha elaborado una metodología para calcular un valor indicativo de la calidad del agua para los ríos en Puerto Rico según los constituyentes seleccionados por varios expertos locales.
- Por medio de varios análisis de sensibilidad se demostró, claramente, que la ecuación escogida para agregar el valor de los subíndices no confronta problemas de ambigüedad ni de eclipsamiento y que la ecuación no favorece ni le asigna un mayor peso a ninguno de los constituyentes seleccionados.

# Conclusiones

- En el análisis de la variación del ICA en tiempo se estableció que ambas estaciones del USGS estudiadas se encontraban en estado de alerta para el período de tiempo estudiado.
- En el análisis de la variación del ICA en espacio se concluyó que la mayor contribución de contaminación proviene de la Quebrada Cerro Gordo y el Río Humatas.

# Recomendaciones

- Ampliar la consulta con los expertos.
- Establecer un sistema de recolección de datos más eficiente.
- Necesitamos metodología moderna y más eficiente para monitorear la calidad del agua.

# Reconocimientos

Francisco Torres, MSCE, P.E.

Estudiante Graduado Ingeniería Civil

Programa de Ingeniería Ambiental y de  
Recursos de Agua

Instituto de Investigaciones sobre Recursos  
de Agua y el Ambiente de Puerto Rico

Universidad de Puerto Rico en Mayagüez