



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Investigación para optar al título de magíster en Gestión de Cuencas Hidrográficas

**FORMULACIÓN DE UN ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUAS PARA CUENCAS RURALES EN
ZONAS DE MONTAÑA BASADO EN UN ESTUDIO DE SUBCUENCAS DE LA CUENCA DOÑA
MARÍA AL OCCIDENTE DEL VALLE DE ABURRÁ**

Autor:

Carlos Mario Uribe García

Ingeniero Agrónomo,

Esp. en Ordenamiento y Gestión de Cuencas Hidrográficas, Esp. Educación Ambiental

Directora:

Yuli Andrea Rodríguez Quiñonez, MSc.

Codirectora:

Lida Rubiela Fonseca Gómez, Mg.

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ciencias y Tecnologías
Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Bogotá, Agosto de 2019

**ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
DE ALTA CALIDAD
MULTICAMPUS**

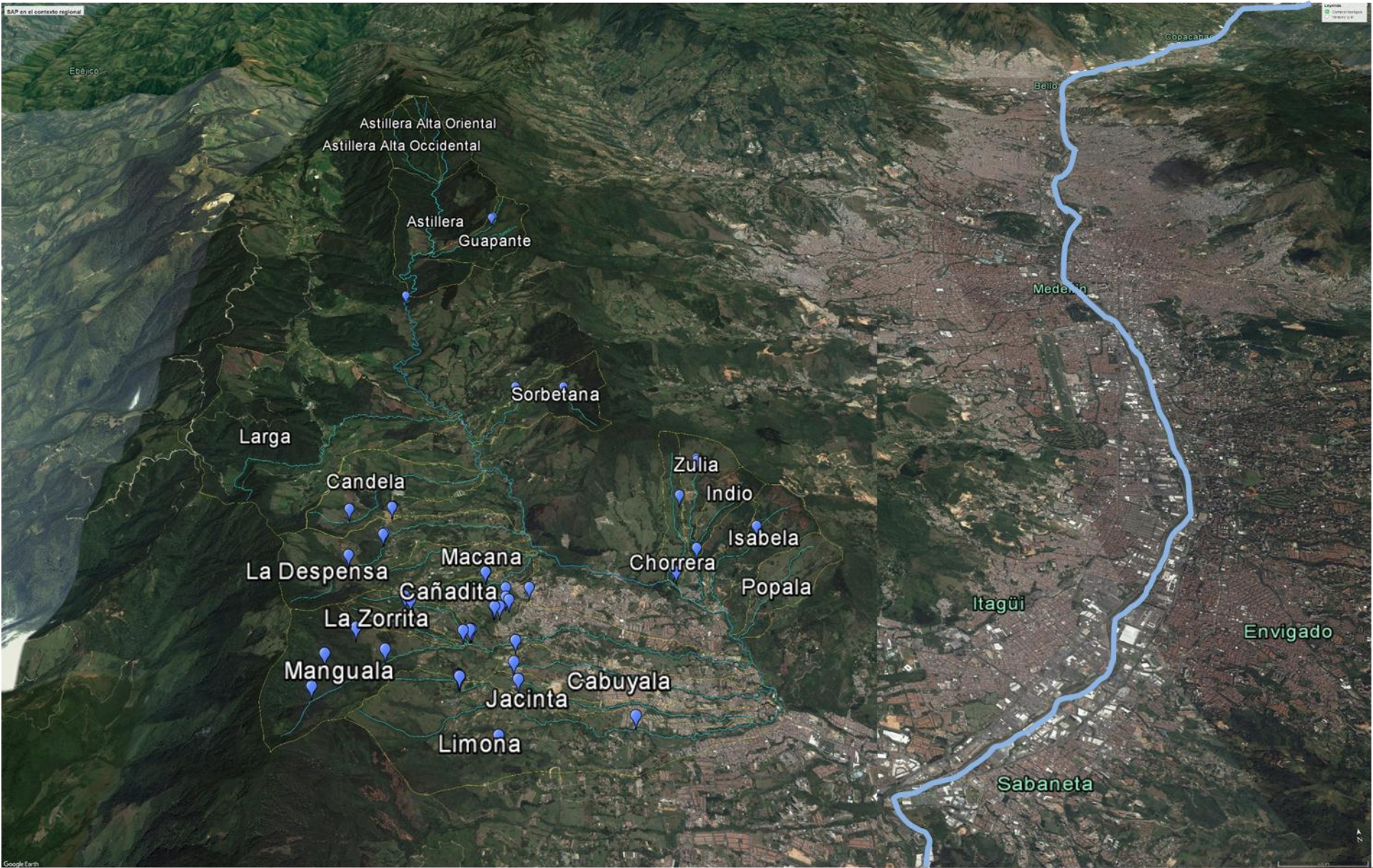
Res. MEN No. 01456 del 29 de enero de 2016

Vigencia por seis años

Enfoque y problema

Estudios de monitoreo de calidad de aguas, en los últimos 11 años, en el marco del Observatorio Ambiental Local (OALSAP), en 20 microcuencas tributarias de la Doña María, **han solicitado reiteradamente que se construya un índice adaptado a las condiciones reales de cuencas rurales de montaña.**

Esta investigación formula, ajusta y prueba un índice (ICA_{CRM}), para a esas condiciones en el valle de Aburrá que puede ser adoptado por otras cuencas similares en el departamento y el país.



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Institución de Educación Superior sujeta a la inspección y vigilancia del Ministerio de Educación Nacional SNIES 1704.



Importancia de la investigación

- ❖ El país no tiene un índice que permita conocer a cabalidad el estado ambiental del agua en cuencas rurales de montaña. **Esta investigación se constituye en un aporte importante al respecto.**
- ❖ **Facilitará correlacionar el estado del agua (físicoquímico y microbiológico) con el estado ambiental de las rondas hídricas y podrá ayudar a ajustar el índice BMWP/Col.**
- ❖ **Aporta nuevas alternativas metodológicas para la construcción de curvas funcionales y se generan curvas para 9 parámetros que pueden ser usadas en otras investigaciones**
- ❖ **Facilita construir un índice simplificado**

UBICACIÓN DE MICROCUENCAS Y SITIOS CONSIDERADOS EN LA INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Institución de Educación Superior sujeta a la inspección y vigilancia del Ministerio de Educación Nacional SNIES 1704.



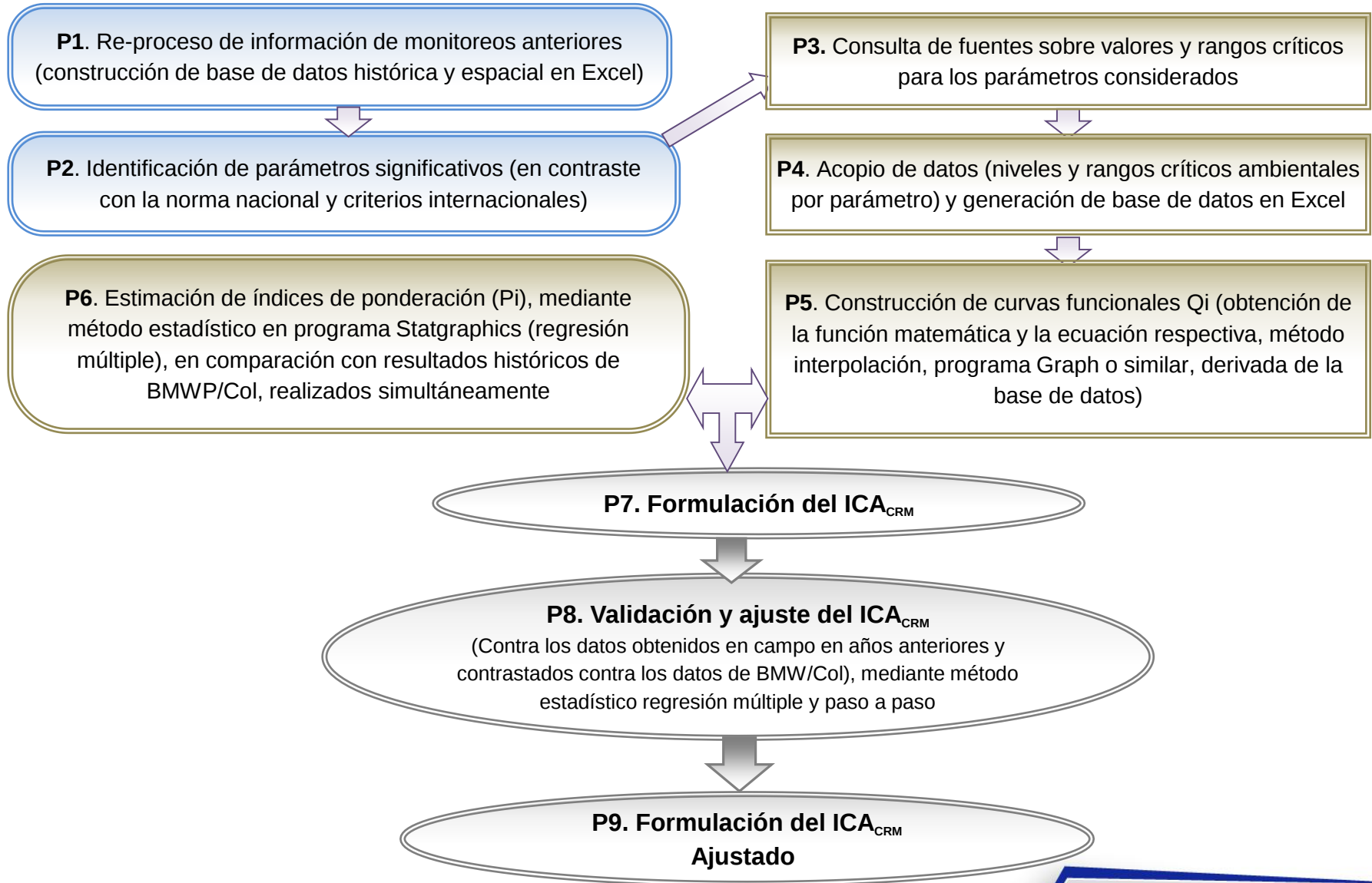
OBJETIVO GENERAL

Formular un índice de calidad ambiental de aguas para cuencas rurales en zonas de montaña con base en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, tomando como caso de estudio subcuencas de la microcuenca Doña María al occidente del Valle de Aburrá

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Identificar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinantes en la cualificación de la calidad aguas superficiales en cuencas rurales en zonas de montaña 
- b. Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i) y los índices de ponderación (P_i) para los parámetros definidos en la ecuación general del ICA, de acuerdo con la normatividad vigente y con investigaciones realizadas en ecosistemas similares (andinos tropicales y ecosistemas equivalentes de otras zonas) 
- c. Construir, calibrar y validar un modelo de ICA definitivo para las microcuencas rurales de montaña. 

METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN Y AJUSTE DEL ÍNDICE



P1. Re-proceso de información de monitoreos anteriores (construcción de base de datos histórica y espacial en Excel)



P2. Identificación de parámetros significativos (en contraste con la norma nacional y criterios internacionales)



P3. Consulta de fuentes sobre valores y rangos críticos para los parámetros considerados



P4. Acopio de datos (niveles y rangos críticos ambientales por parámetro) y generación de base de datos en Excel



P5. Construcción de curvas funcionales Q_i (obtención de la función matemática y la ecuación respectiva, método interpolación, programa Graph o similar, derivada de la base de datos)

P6. Estimación de índices de ponderación (P_i), mediante método estadístico en programa Statgraphics (regresión múltiple), en comparación con resultados históricos de BMWP/Col, realizados simultáneamente

P7. Formulación del ICA_{CRM}



P8. Validación y ajuste del ICA_{CRM}

(Contra los datos obtenidos en campo en años anteriores y contrastados contra los datos de BMW/Col), mediante método estadístico regresión múltiple y paso a paso



**P9. Formulación del ICA_{CRM}
Ajustado**



Parámetros considerados entre 2007 y 2017: 16 (21)

Físico-Químicos: DBO5 total, DQO total, dureza total, **oxígeno disuelto**, **saturación de oxígeno**, **pH**, sólidos suspendidos totales, **sólidos disueltos totales**, **conductividad eléctrica**, **ORP**, turbidez, **temperatura del agua**, **temperatura del aire**.

Además nitritos, nitratos, plaguicidas, dureza, grasas y aceites

* **Medidos directamente en campo**

Microbiológicos: **Coliformes totales y coliformes fecales**

Biológicos: **Macroinvertebrados**

Incumplen la norma

CT, CF, DBO₅, DQO, OD, %SAT OD, T, CE, SST

Prueba de hipótesis

Paso 1. Formulación de hipótesis:

Hipótesis nula: Las variables incluidas en el modelo ICA_{CRM} no explican la variación en BMWP/Col

Hipótesis alternativa: Las variables incluidas en el modelo ICA_{CRM} explican la variación en BMWP/Col

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para al menos un } j$$

Paso 2. Definición del nivel de significancia: 0,05.

$$\alpha = 0,05$$

F = CMR/CME con distribución Fisher (k,n-k-1), donde: CMR es el cuadrado medio residual y CME es el cuadrado medio estimado

Esta razón se calcula para k (número de variables, 9), y n (tamaño de la muestra, 59).

Prueba de hipótesis

Paso 3. Cálculos:

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	9	178198,46	19799,83	48,8437	2,02115E-21
Residuos	50	20268,54	405,37		
Total	59	198467			

F crítico: $F(1-\alpha; k; n-k-1) = F(0,95; 9; 49) = 2,0775$

Paso 4: Determinación regla de decisión:

$\alpha = 0,05$

Se rechaza H_0 si $F_{cal} > 2,0775$

Se acepta H_0 si $F_{cal} \leq 2,0775$

Como $F_{cal} = 48,8437 > 2,0775$, **entonces se rechaza H_0**

H1: Las variables incluidas en el modelo ICA_{CRM} explican la variación en $BMWP/Col$

Resultados: Compendio y análisis de datos de las BD monitoreos anteriores (2007-2017)

Vigencia por seis años

Objetivo 1: Identificar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos determinantes

Tabla 2. Número de sitios y parámetros que históricamente incumplen la norma y porcentaje con relación a los sitios evaluados

PARÁMETRO	AÑO												Promedio Incumple
	2007		2008		2009		2012		2013		2015-16		
	# sitios	% sitios	# sitios	% sitios	# sitios	% sitios	# sitios	% sitios	# sitios	% sitios	# sitios	% sitios	
CT*	14	88%	43	96%	46	90%	53	96%	55	100%	60	100%	94,9%
CF*	13	81%	42	93%	37	73%	37	67%	41	75%	50	83%	78,7%
DBO ₅ *	4	25%	15	33%	13	25%	14	25%	8	15%	17	28%	25,4%
DQO*	1	6%	15	33%	15	29%	13	24%	3	5%	12	20%	19,7%
OD*	0	0%	8	18%	6	12%	5	9%	2	3%	6	9%	8,5%
SST**	0	0%	1	2%	2	4%	2	4%	2	4%	2	3%	2,9%
Turbidez***	3	19%	25	78%	22	43%	25	57%	20	50%	23	38%	47,5%
CE**									63	100%	65	100%	100,0%
%Sat OD									2	3%	6	9%	6,2%

* Decreto 1076/2015

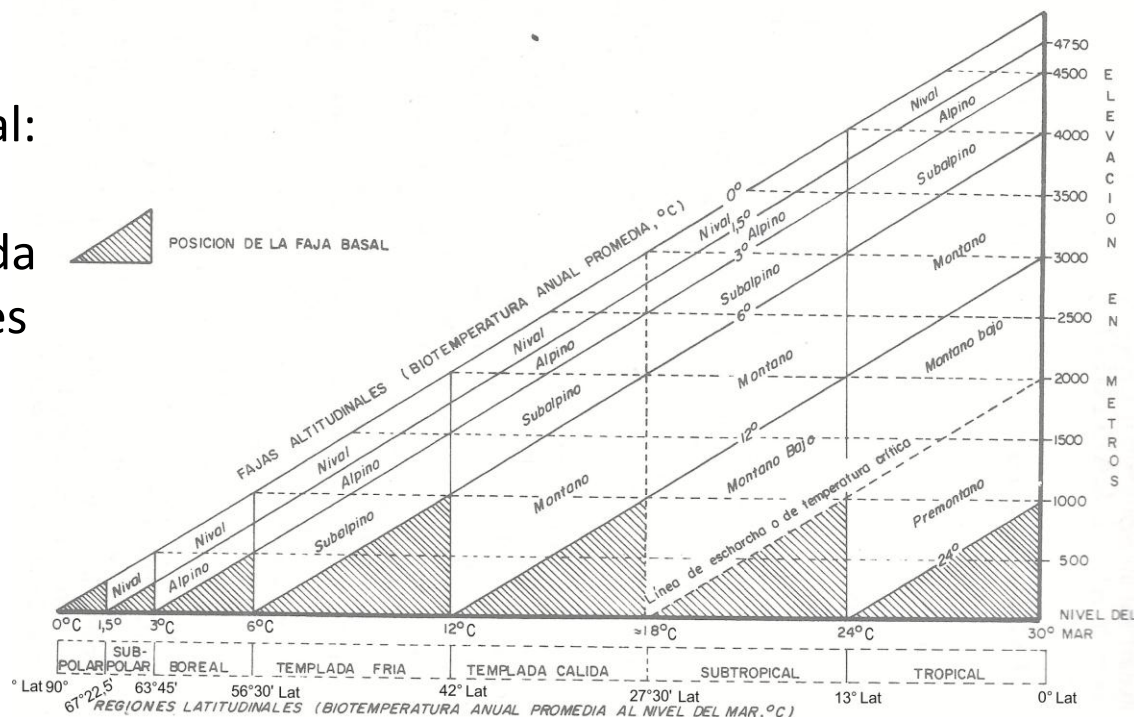
** Objetivos de Calidad río Aburrá-RedRío (Tramo 3) (Resolución 2016/2012)

*** Otras fuentes

Como resultado de los dos primeros pasos se eligen 9 parámetros ([objetivo 1](#))

Objetivo 2a: Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i)

Resultados – Criterio fundamental: datos de zonas ecológicas equivalentes a las de zonas de vida predominantes en cuencas rurales de montaña



Consulta de mas de 150 fuentes bibliográficas (60 resultaron pertinentes y apropiadas para obtención de datos). Se creó una base de datos en Excel con valores de niveles y rangos de calidad para cada parámetro incluido en la ecuación final de ICA_{CRM} .

Se ingresaron cerca de 1000 datos para los 9 parámetros, y luego de un proceso de depuración se llegó a cerca de 600 datos

Objetivo 2a: Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i)

Resultados – Construcción y depuración de BD sobre rangos y niveles considerados a nivel nacional e internacional para cada parámetro en el proceso de construcción de para curvas funcionales

				A	B	C	D
7	1	0,05	Colombia				Monit SAP, 2016
8	1,5	0,1	Colombia				Monit SAP, 2016
9	1,9	0	Georgia, USA				Northeast Georgia Regional Development Center, 2001
10	2	0,1	USA				Curvas y ecuaciones adoptadas de Cude, 2001 (para OD _{WQI}) (ICATEST, 2005)
11	2	0,05	China				Siyu Chen et al, 2018
12	2	0,2	Georgia, USA				Northeast Georgia Regional Development Center, 2001
13	2	0,1	Mundo				UNESCO/OMS/UNEP, 1996
14	2	0,2	Samoa				Seumaloisalaifai Afelê Faiilagi, 2015
15	2	0,15	Colombia				Monit SAP, 2016
16	2,5	0,2	Colombia				Monit SAP, 2016
17	2,9	0,1	CEE				ajus UNEP, OMS and WSSCC (1997)
18	3	0,1	USA				Curvas y ecuaciones adoptadas de Cude, 2001 (para OD _{WQI}) (ICATEST, 2005)
19	3	0,25	China				Siyu Chen et al, 2018
20	3	0,3	USA				https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-a
21	3	0,4	Oklahoma				Oklahoma's Water Quality Standards,2017
22	3	0,4	Colombia				Monit SAP, 2016
23	3,3	0,1	USA				Curvas y ecuaciones adoptadas de Cude, 2001 (para OD _{WQI}) (ICATEST, 2005)
24	3,4	0,12	USA				Curvas y ecuaciones adoptadas de Cude, 2001 (para OD _{WQI}) (ICATEST, 2005)
25	3,5	0,65	Colombia				Monit SAP, 2016
26	3,9	0,4	CEE				ajus UNEP, OMS and WSSCC (1997)
27	4	0,4	Perú				DS 02 de 2008, DS 15 de 2015
28	4	0,25	USA				Curvas y ecuaciones adoptadas de Cude, 2001 (para OD _{WQI}) (ICATEST, 2005)
29	4	0,6	CEE				UNEP, OMS and WSSCC (1997)
30	4	0,5	Georgia, USA				Northeast Georgia Regional Development Center, 2001
31	4	0,6	Malasia				DOE-INWQS (Bai. Y y otros), 2009
32	4	0,6	Oklahoma				Oklahoma's Water Quality Standards,2017
33	4	0,6	Mundo				UNESCO/OMS/UNEP, 1996
34	4	0,6	España				REAL DECRETO 927/1988 de España
35	4	0,4	State of Texas				Texas Surface Water Quality Standards, 2014
				Sat OD ajus	OD ajus	CF ajus	CT ajus
				CE ajus	DBO5 ajus	DQO ajus	SST ajus
				Turb ajus	pH		
				+			

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,8	Colombia
19	85	0,92	Colombia
20	90	1	USA
21	90	1	CEE
22	90	0,97	Colombia
23	95	0,99	Colombia
24	100	1	USA
25	100	1	CEE
26	100	1	Colombia
27	105	1	Colombia
28	110	1	USA
29	110	1	CEE
30	110	0,98	Colombia
31	115	0,95	Colombia
32	120	1	CEE
33	120	0,92	Colombia
34	125	0,9	Colombia

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,8	Colombia
19	85	0,92	Colombia
20	90	1	USA
21	90	1	CEE
22	90	0,97	Colombia
23	95	0,99	Colombia
24	100	1	USA
25	100	1	CEE
26	100	1	Colombia
27	105	1	Colombia
28	110	1	USA
29	110	1	CEE
30	110	0,98	Colombia
31	115	0,95	Colombia
32	120	1	CEE
33	120	0,92	Colombia
34	125	0,9	Colombia

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,8	Colombia
19	85	0,92	Colombia
20	90	1	USA
21	90	1	CEE
22	90	0,97	Colombia
23	95	0,99	Colombia
24	100	1	USA
25	100	1	CEE
26	100	1	Colombia
27	105	1	Colombia
28	110	1	USA
29	110	1	CEE
30	110	0,98	Colombia
31	115	0,95	Colombia
32	120	1	CEE
33	120	0,92	Colombia
34	125	0,9	Colombia

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,8	Colombia
19	85	0,92	Colombia
20	90	1	USA
21	90	1	CEE
22	90	0,97	Colombia
23	95	0,99	Colombia
24	100	1	USA
25	100	1	CEE
26	100	1	Colombia
27	105	1	Colombia
28	110	1	USA
29	110	1	CEE
30	110	0,98	Colombia
31	115	0,95	Colombia
32	120	1	CEE
33	120	0,92	Colombia
34	125	0,9	Colombia

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,8	Colombia
19	85	0,92	Colombia
20	90	1	USA
21	90	1	CEE
22	90	0,97	Colombia
23	95	0,99	Colombia
24	100	1	USA
25	100	1	CEE
26	100	1	Colombia
27	105	1	Colombia
28	110	1	USA
29	110	1	CEE
30	110	0,98	Colombia
31	115	0,95	Colombia
32	120	1	CEE
33	120	0,92	Colombia
34	125	0,9	Colombia

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,8	Colombia
19	85	0,92	Colombia
20	90	1	USA
21	90	1	CEE
22	90	0,97	Colombia
23	95	0,99	Colombia
24	100	1	USA
25	100	1	CEE
26	100	1	Colombia
27	105	1	Colombia
28	110	1	USA
29	110	1	CEE
30	110	0,98	Colombia
31	115	0,95	Colombia
32	120	1	CEE
33	120	0,92	Colombia
34	125	0,9	Colombia

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,8	Colombia
19	85	0,92	Colombia
20	90	1	USA
21	90	1	CEE
22	90	0,97	Colombia
23	95	0,99	Colombia
24	100	1	USA
25	100	1	CEE
26	100	1	Colombia
27	105	1	Colombia
28	110	1	USA
29	110	1	CEE
30	110	0,98	Colombia
31	115	0,95	Colombia
32	120	1	CEE
33	120	0,92	Colombia
34	125	0,9	Colombia

A	B	C	D
1	0	0	Colombia
2	10	0,01	Colombia
3	20	0,02	Colombia
4	30	0,3	España
5	30	0,1	Colombia
6	40	0,2	Colombia
7	50	0,6	España
8	50	0,3	Colombia
9	50	0,5	Colombia
10	60	0,6	Colombia
11	65	0,6	Colombia
12	70	1	España
13	70	1	CEE
14	70	0,65	Colombia
15	75	0,75	Colombia
16	80	1	Nueva Zelan
17	80	1	CEE
18	80	0,	

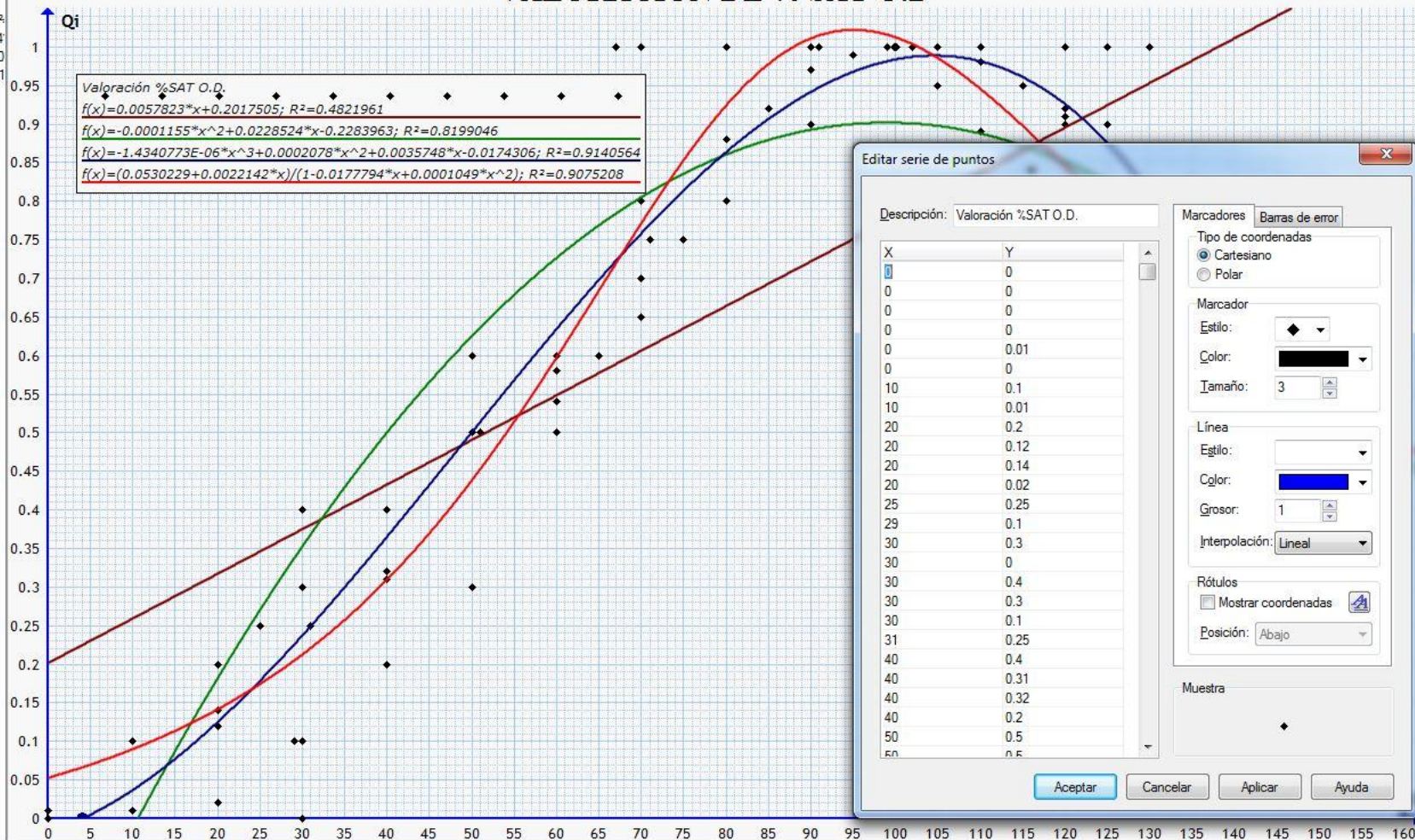
Objetivo 2a: Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i)

Archivo Editar Función Zoom Calcular Complementos Ayuda



- ☒ Ejes
- ☒ Valoración %SAT O.D.
- ☒ $f(x)=0.0057823*x+0.2017505$; $R^2=0.8199046$
- ☒ $f(x)=-0.0001155*x^2+0.0228524*x-0.2283963$; $R^2=0.9140564$
- ☒ $f(x)=-1.4340773E-06*x^3+0.0002078*x^2+0.0035748*x-0.0174306$; $R^2=0.9075208$
- ☒ $f(x)=(0.0530229+0.0022142*x)/(1-0.0177794*x+0.0001049*x^2)$

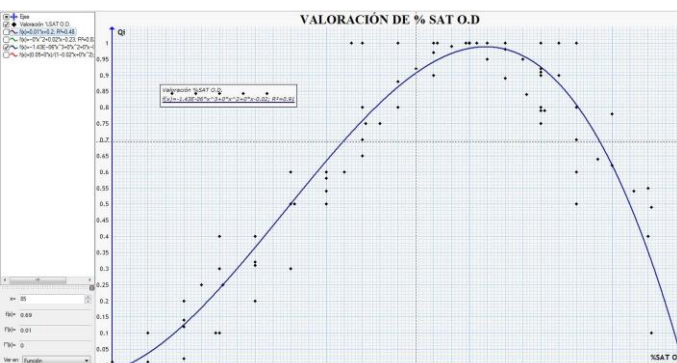
VALORACIÓN DE % SAT O.D.



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

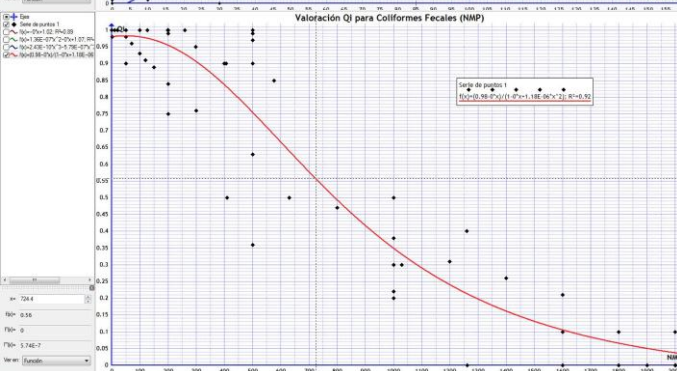


Objetivo 2a: Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i)



$$Q_{i\text{SatOD}} = -1,4340773 \cdot 10^{-6} \cdot \text{SatOD}^3 + 2,078 \cdot 10^{-4} \cdot \text{SatOD}^2 + 0,0035748 \cdot \text{SatOD} - 0,0174306$$

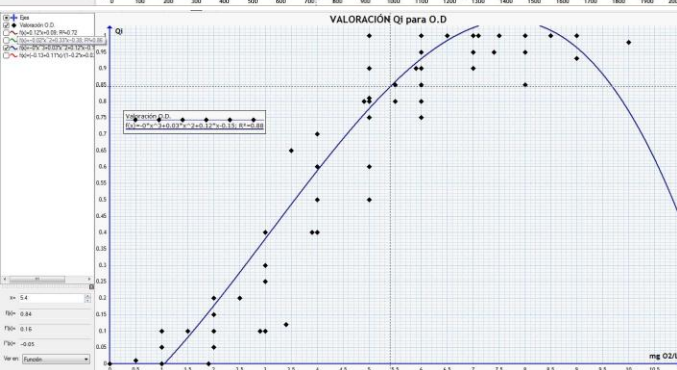
$$R^2 = 0,9141$$



$$Q_{i\text{CF}} = (0,9836679 - 0,0004041 \cdot \text{CF}) / (1 - 0,0004723 \cdot \text{CF} + 1,1381201 \cdot 10^{-6} \cdot \text{CF}^2)$$

Si CF > 2357 NMP, Qi=0

$$R^2 = 0,9186$$



Si OD ≤ 1,16 mg/L, Qi=0

Si OD > 1,16 mg/L y ≤ 6,48 mg/L, o Si OD > 8,06, entonces

$$Q_{i\text{OD}} = -0,0032863 \cdot \text{OD}^3 + 0,0307757 \cdot \text{OD}^2 + 0,1126933 \cdot \text{OD} - 0,1469681$$

Si OD > 6,48 mg/L y OD ≤ 8,06, Qi= 1

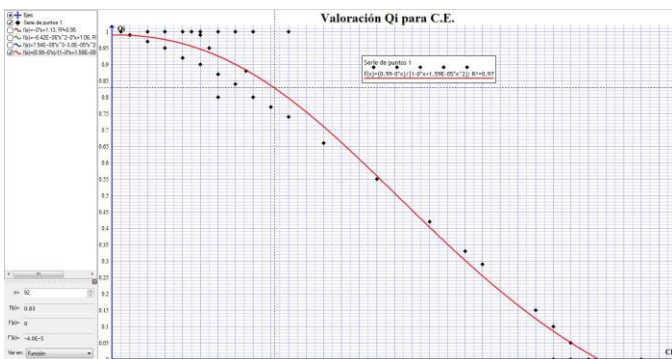
$$R^2 = 0,8927$$



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA



Objetivo 2a: Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i)

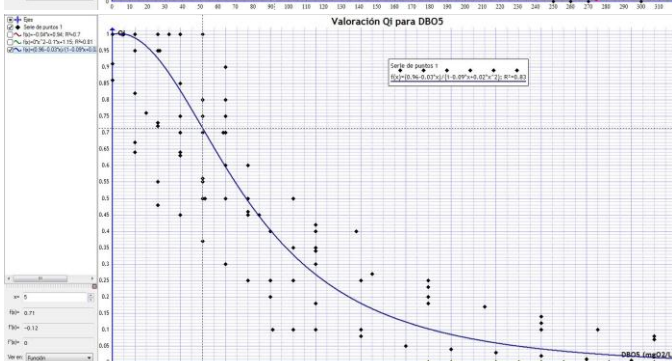


Si $CE \leq 274,3 \mu\text{S/cm}$ entonces

$$Q_{i_{CE}} = (0,9900409 - 0,003589 * CE) / (1 - 0,0036712 * CE + 1,5867147 \cdot 10^{-5} * CE^2)$$

Si $CE > 274,3 \mu\text{S/cm}$, $Q_i = 0$

$$R^2 = 0,9728$$



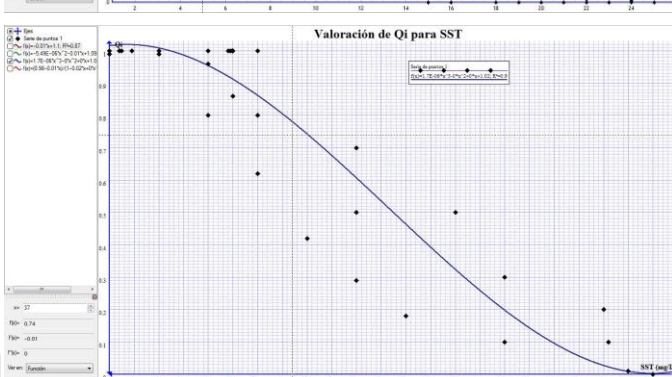
Si $DBO_5 \leq 1,51 \text{ mg de O}_2/\text{L}$, $Q_i = 1$

Si $DBO_5 > 1,51 \text{ mg de O}_2/\text{L}$ y $< 19,54 \text{ de O}_2/\text{L}$, entonces

$$Q_{i_{DBO}} = 0,0022496 * DBO^2 - 0,1023114 * DBO + 1,1451398$$

Si $DBO_5 > 19,55 \text{ mg de O}_2/\text{L}$, $Q_i = 0$

$$R^2 = 0,81$$



Si $SST \leq 20,1 \text{ mg/L}$, $Q_i = 1$

Si $SST > 20,1 \text{ mg/L}$ y $\leq 135,7 \text{ mg/L}$, entonces

$$Q_{i_{SST}} = (0,984099 - 0,0070292 * SST) / (1 - 0,015495 * SST + 3,917 \cdot 10^{-4} * SST^2)$$

Si $SST > 135,7 \text{ mg/L}$, $Q_i = 0$

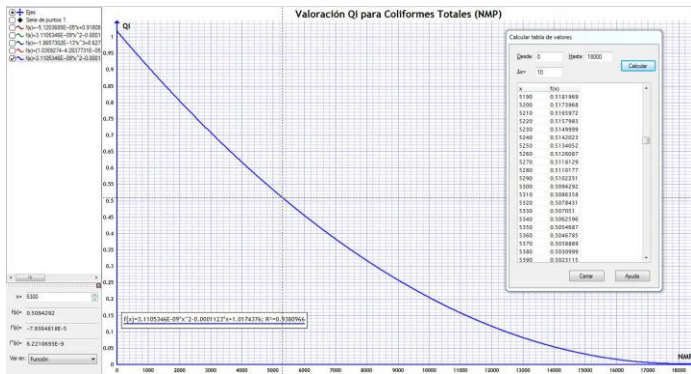
$$R^2 = 0,9256$$



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA



Objetivo 2a: Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i)



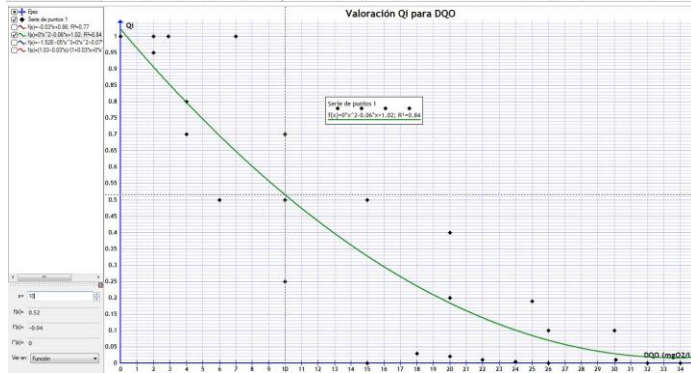
Si $CT \leq 156$ NMP, $Q_i = 1$

Si $CT > 156$ NMP, entonces

$$Q_{iCT} = 3,1105346 \cdot 10^{-9} \cdot CT^2 - 1,123 \cdot 10^{-4} \cdot CT + 1,0174376$$

Si $CT > 17450$ NMP, $Q_i = 0$

$$R^2 = 0,9381$$



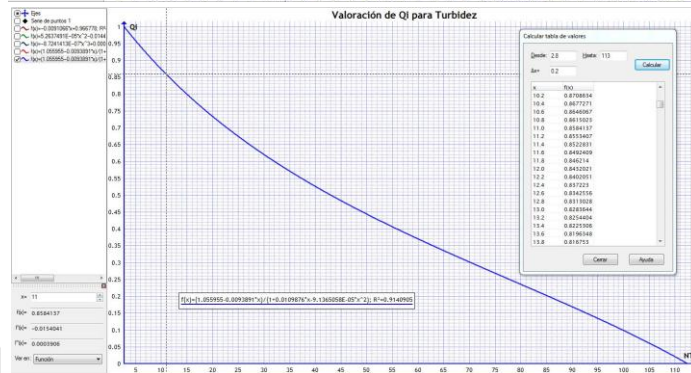
Si $DQO \leq 0,3 \text{ mg de O}_2/\text{L}$, $Q_i=1$

Si DQO $>0,3$ mg de O_2/L y $\leq 33,8$ de O_2/L , entonces

$$Q_{iDQO} = 8,803 \cdot 10^{-4} \cdot DQO^2 - 0,0595082 \cdot DQO + 1,0222551$$

Si DQO > 33,8 mg de O_2 /L, $Q_i = 0$

$$R^2 = 0,8398$$



Si $T \leq 3 \text{ UNT}$, $Q_i=1$

Si $T > 3 \text{ UNT}$ y $\leq 111,9 \text{ UNT}$, entonces

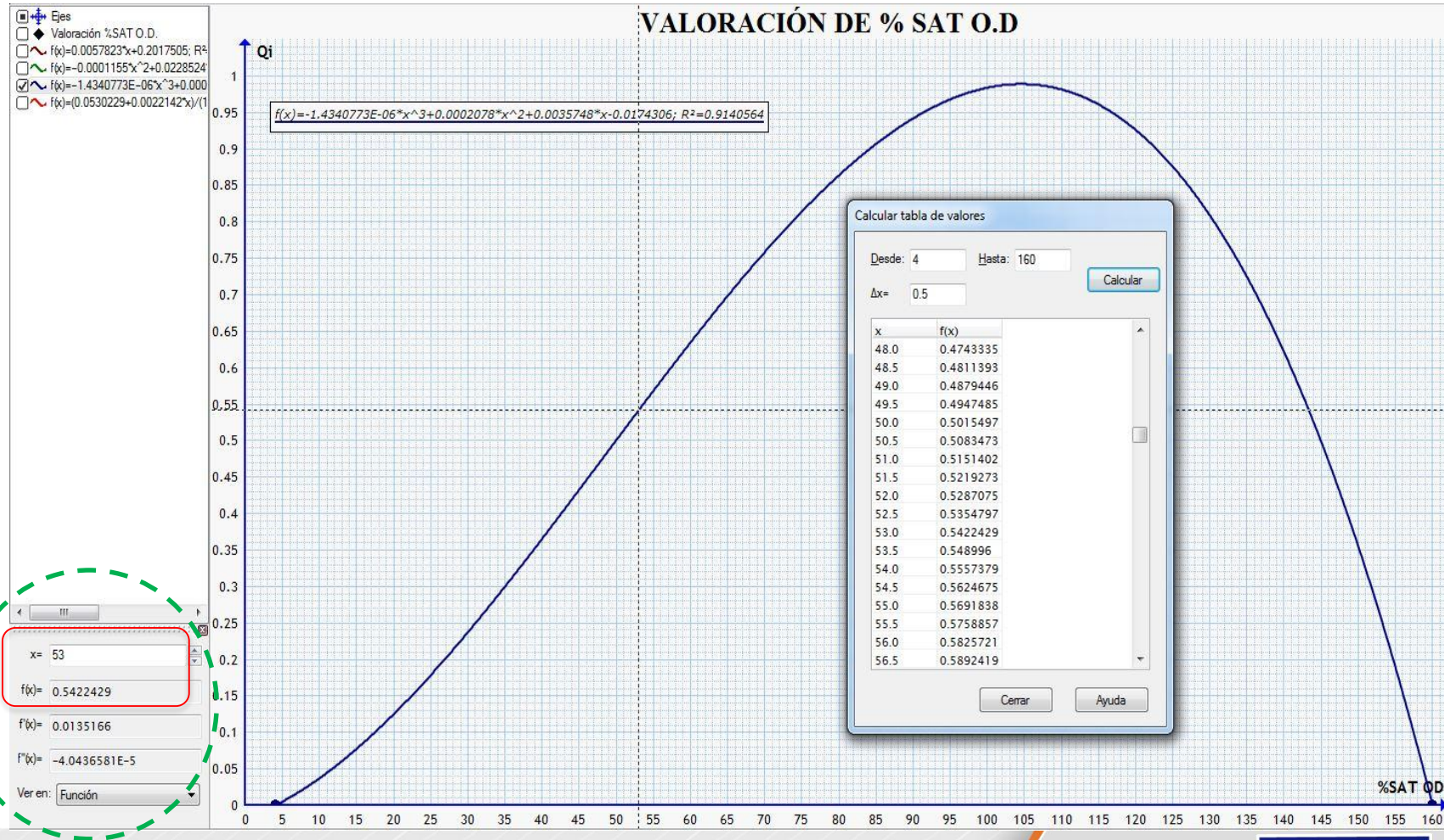
$$Q_{iT} = (1,055955 - 0,0093891 \cdot T) / (1 + 0,0109876 \cdot T - 9,1365058 \cdot 10^{-5} \cdot T^2)$$

Si $T > 112 \text{ UNT}$, $Q_i = 0$

$$R^2 = 0,9141$$

Objetivo 2a: Construir las curvas de calidad paramétrica o índices de calidad (Q_i)

Consulta de valores Q_i en cada curva paramétrica definitiva



Objetivo 2b: Determinar los índices de ponderación (P_i)

- Se realizaron tres pruebas.
- **Prueba definitiva.** similar a la selección del modelo de regresión con el procedimiento paso hacia atrás, pero considerando todas las opciones posibles de combinaciones y eliminación progresiva de variables

Se evaluaron en total 512 modelos. Cada uno con varios estadísticos que ayudan en la decisión

Objetivo 2b: Determinar los índices de ponderación (P_i)

Para las **decisiones finales** se tuvieron en cuenta los siguientes **criterios**:

-Se tuvo en cuenta las recomendaciones internacionales sobre el **número ideal de variables** en este tipo de modelos (**entre 7 y 9**)

-Se tuvo en cuenta no sólo el valor máximo de **R^2** , sino que se consideraron además otros criterios en especial **C_p de Mallows**

Además, criterio de información de Akaike, AIC, y el CME

Objetivo 2b: Determinar los índices de ponderación (P_i)

Determinación de los P_i en función de distintas opciones de modelos

ID modelo	R-Cuadrada Ajustada	Cr	GME	AIC	Variables	# variables	Variables eliminadas	# criterios cumplen	# criterios ajuste
				6,09	BC	2	sin CT, DQO, OD, T, Sat OD, CE, SST	1	1
77	59,3	2,51	383	6,08	BCE	3	sin CT, DQO, OD, Sat OD, CE, SST	4	3
80	58,3	3,87	393	6,11	BCI	3	sin CT, DQO, OD, T, Sat OD, CE	1	1
193	59,9	2,83	378	6,1	BCEG	4	sin CT, DQO, T, CE, SST	4	3
133	59,2	3,7	384	6,12	ABCE	4	sin DQO, OD, Sat OD, CE, SST	4	3
198	58,8	4,17	388	6,13	BCFI	4	sin CT, DQO, OD, Sat OD, CE	2	2
188	58,6	4,48	390	6,14	BCDE	4	sin CT, OD, Sat OD, CE, SST	1	1
192	58,7	4,37	389	6,16	BCEF	4	sin CT, DQO, Sat OD, CE, SST	1	1
196	58,6	4,49	390		BCFG	4	sin CT, DQO, OD, CE, SST	0	0
197	58,6	4,49	390		BCFH	4	sin CT, DQO, OD, Sat OD, SST	0	0
136	58,3	4,89	393		ABCI	4	sin DQO, OD, T, Sat OD, CE	0	0
450	60,4	4,24	373	6,16	BCEFGI	6	sin CT, DQO, CE	4	3
449	60,3	4,44	374	6,16	BCEFGH	6	sin CT, DQO, SST	4	3
393	60,3	4,39	374	6,16	ABCEFG	6	sin DQO, SST, CE	4	3
452	59,4	5,48	382		BCEGHI	6	sin CT, DQO, T	2	1
453	57,4	8,05	402		BCFGHI	6	sin CT, DQO, OD	0	0
451	57,3	8,1	402		BCEFGI	6	sin CT, DQO, Sat OD	0	0
500	59,7	6,17	380	6,21	BCEFGHI	7	sin CT, DQO	4	3
477	59,6	6,28	381	6,21	ABCEFGH	7	sin DQO, SST	4	3
495	59,5	6,38	381		BCDEFGH	7	sin CT, SST	3	2
479	57,1	9,35	404		ABCEFGI	7	sin DQO, Sat OD	0	0
497	56,5	10,1	410		BCDEFGI	7	sin CT, Sat OD	0	0
508	59	8,04	386	6,26	ABCEFGHI	8	sin DQO	2	2
511	58,9	8,12	387	6,26	BCDEFGHI	8	sin CT	2	2
504	58,9	8,13	387	6,26	ABCEFGI	8	sin CE	1	1
503	58,9	8,22	388	6,27	ABCEFGH	8	sin SST	1	1
512	58,2	10	394	6,31	ABCEFGHI	9	NINGUNA	2	2



Objetivo 2b: Determinar los índices de ponderación (P_i)

Modelo 500, con 7 variables, sin incluir CT ni DQO:

R^2 ajustado = 89,854, Los coeficientes o **índices de ponderación** obtenidos **mediante regresión multivariada** son:

parámetro	subíndice	parámetro	subíndice	parámetro	subíndice
CF	34,577	SatOD	188,56	T	-66,681
DBO5	35,459	CE	5,8991		
OD	-153,79	SST	44,591		

El valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05: hay una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El Coeficiente de determinación, R^2 ajustado, indica que el modelo explica 89,9% de la variabilidad en el ICA_{CRM} en función del BMWP/Col.

[\(Objetivo 2\)](#)

Objetivo 3: Construir, calibrar y validar un modelo de ICA

Resultados – Modelo y tabla de calificación

$$ICA_{CRM} = 34,58 * Q_{iCF} + 35,46 * Q_{iDBO} - 153,79 * Q_{iOD} - 66,68 * Q_{iT} + 188,56 * Q_{iSatOD} + 5,9 * Q_{iCE} + 44,59 * Q_{iSST}$$

		RANGO
5	EXCELENTE	82,41- 88,62
4	BUENA	69,11 - 82,4
3	REGULAR	40 - 69,1
2	MALA	25,71 - 39,99
1	MUY MALA	0 - 25,7

Objetivo 3: Construir, calibrar y validar un modelo de ICA

Calibración y ajuste de este modelo de siete variables contra los valores del BMWP/Col, en los 59 sitios de 18 microcuencas, mediante regresión lineal múltiple

MODELO	r	R ²
ICACRM (7 variables)	0,794	0,63
ICACRM (9 variables)	0,792	0,627

Objetivo 3: Construir, calibrar y validar un modelo de ICA

Validación con datos de 10 sitios en 4 microcuencas del monitoreo 2017

SITIO DE QUEBRADA	Qi CF	Qi DBO	Qi OD	Qi T	Qi Sat OD	Qi CE	Qi SST	VALOR ICA _{CRM}	Suma BMWP/Col
Manguala Alta - Brazo 1 - Bocat. Potrerito	0,98	1,00	0,98	1,00	0,91	0,95	1,00	72,96	110
Manguala Alta -Brazo 2. Bocat. Manantial	0,98	1,00	1,00	1,00	0,93	0,94	1,00	74,82	73
Limona 1 Alta - Bocatomas	0,98	1,00	0,89	1,00	0,81	0,66	1,00	67,21	96
Limona 2 Alta	0,00	1,00	1,00	0,84	0,94	0,80	1,00	51,69	57
Guapante Alta (Bocatoma)	0,98	1,00	1,00	1,00	0,96	0,97	1,00	81,09	140
Afluente 2 Guapante Alta	0,98	1,00	1,00	0,93	0,91	0,98	1,00	74,86	156
Afluente 1 Guapante Alta	0,98	1,00	1,00	1,00	0,93	0,97	1,00	75,35	130
Guapante Media Alta (Via)	0,97	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	85,48	158
Astillera Alta (Via)	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	85,74	131
Afluente Astillera Media Alta (Via)	0,98	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	85,50	102

Objetivo 3: Construir, calibrar y validar un modelo de ICA

Validación con datos de 10 sitios en 4 microcuencas del monitoreo 2017.

Método regresión. Realizado en Excel

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9788
Coefficiente de determinación R^2	0,958
R^2 ajustado	0,8469
Error típico	16,4368
Observaciones	10

Coefficiente correlación $r = 0,978$

Coefficiente de determinación R^2 ajustado = 0,847

El modelo ICA_{CRM} explica el 84,7% de la variación en el BMWP/Col

(Objetivo 3)

Comparación con otros modelos internacionales de uso en Colombia

Se comparó el ICA_{CRM} con cinco modelos, cuatro de los cuales están incluidos en el programa ICATEST V1,0. Base 59 sitios de 18 microcuencas

Modelo	r	R ² ajustado
ICA_{CRM} (Modelo estadístico, propuesto por esta investigación)	0,791	61,93 %
ICA_{CRME} (Modelo empírico)	0,719	50,81 %
ICA León (1998)*	0,704	48,69 %
ICA NFS*	0,682	45,60%
ICA Dinius*	0,723	52,0%
ICA OWQI*	0,692	47,89%

* Cálculos con programa ICATest v 1.0.

Conclusión: ICA_{CRM} explica mejor que los demás modelos la calidad ambiental del agua en cuencas rurales de montaña

PROCESO DE SOCIALIZACIÓN

Se llevó a cabo entre agosto de 2018 y junio de 2019, en el marco del Observatorio Ambiental Local (OALSAP) y se proyecta continuar por lo menos 5 años más



* 5 reuniones de socialización, planeación de acciones, socialización de resultados, gestión con instituciones para la restauración, incluyendo el ofrecimiento al OALSAP y a la Alianza en Defensa de La Cabuyala, para insertar la investigación de maestría con el proceso de restauración de esa microcuenca tributaria de la Doña María.

PROCESO DE SOCIALIZACIÓN

* 3 salidas de campo para levantamiento de información y diagnóstico participativo



PROCESO DE SOCIALIZACIÓN

* Un encuentro entre las organizaciones sociales que hacen parte de la Alianza en Defensa de La Cabuyala y varias instituciones públicas como la Corregiduría, EPM, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia, Secretaría del Medio Ambiente de Medellín, Secretaría de Salud de Medellín, Secretaría de Control Territorial de Medellín, entre otras, para la concertación de acciones coordinadas, entre la sociedad civil y el estado, para la restauración de la quebrada y sus retiros.



CONCLUSIONES

- Las curvas funcionales construidas en al investigación funcionan bien en el modelo creado y permiten ser consultadas y usadas en otras investigaciones
- Es conveniente generar nuevas investigaciones basadas en bioensayos con las especies nativas de las cuencas rurales de montaña, con el fin de continuar ajustando las curvas funcionales
- El índice de calidad ambiental de aguas para cuencas rurales en zonas de montaña debe contemplar por lo menos siete parámetros fundamentales: CF, BDO5, OD, T, CE, SST y Sat OD.
- Opcionalmente puede usarse un modelo simplificado con tres variables: CF, DBO5 y Sat OD, pero es preferible el de siete variables.

CONCLUSIONES

- En la formulación de modelos ajustados estadísticamente en cuanto a ICA para cuencas rurales de montaña, deben ser considerados varios estadísticos, además del estadístico R^2 ajustado
- El modelo ICA_{CRM} explica el 89,9% de la variabilidad en BMWP/Col, que se tomó como comparativo ideal del modelo ICA_{CRM} . Estos resultados, si bien son buenos, aún dejan un margen para el perfeccionamiento del modelo.
- El modelo ICA_{CRM} , explica mejor el estado de calidad ambiental del agua, que otros modelos internacionales usados en Colombia.

RECOMENDACIONES

- **Se recomienda al OALSAP, y a las autoridades ambientales de la cuenca del río Aburrá, adoptar el presente índice de calidad ambiental del agua (ICA_{CRM}) y aplicarlo en las subcuencas rurales de montaña que tributan a la microcuenca Doña María y al río Aburrá.**
- **Se recomienda a la gobernación de Antioquia y a instituciones del orden nacional como el IDEAM, evaluar y probar el presente índice** en las condiciones ambientales de **sus respectivos territorios**, en las cuencas rurales de montaña, y se invita a hacer uso de las curvas funcionales construidas para el efecto.
- **Se recomienda a los centros de investigación y académicos, emprender investigaciones de bioensayos con especies nativas bioindicadoras y preferiblemente contempladas en el índice BMWP/Col,** en cuanto a los efectos de variaciones en niveles de los parámetros considerados en esta investigación, y mejorar, si es del caso, las curvas funcionales construidas, mediante la inserción de nuevos datos basados en bioensayos locales.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los centros de investigación y académicos, evaluar la conveniencia de **ajustar el índice BMWP/Col, mediante la incorporación de una variable sobre el estado ambiental de las rondas hídricas.**
- Se recomienda iniciar un proceso **mejoramiento continuo** entre los modelos **ICA_{CRM}** y **BMWP/Col** y así mejorar su complementariedad.
- **Se recomienda a la universidad de Pamplona incorporar el ICA_{CRM} en su programa ICATest,** pero sin la posibilidad de aplicarlo de manera simplificada
- Se recomienda a las instituciones públicas en especial a **Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)** y a **Corantioquia**, así como al municipio de Medellín, **apoyar** desde el corto y hasta el largo plazo las actividades comunitarias relacionadas con los monitoreos ambientales que implementa **el Observatorio Ambiental Local de San Antonio de Prado (OALSAP)**

GRACIAS

CONTACTO:

Carlos Mario Uribe García, I.A.,
Esp. Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hid.
Esp. Educación Ambiental
Maestrante en Gestión de Cuencas Hidrográficas

carurib@yahoo.com

carlosuribe@ustadistancia.edu.co

Celular 3013685160