



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable para consumo humano en Colombia.**

**Laura Daniela Macías Rodríguez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C, Colombia  
2017



# **Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable para consumo humano en Colombia.**

**Laura Daniela Macías Rodríguez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en ingeniería- recursos hidráulicos**

Director (a):

Ph.D. Martha Cristina Bustos López

Línea de Investigación: Ecotoxicidad

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en resiliencia y saneamiento (RESA)

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá D.C, Colombia

2017



*Fueron 2 años de experiencias, de aprendizaje, de madurez, sin embargo, este trabajo culminó en un momento difícil de mi vida.*

*En memoria a William Restrepo Roldán, más que un amigo, un padre, un pilar, con tu partida aprendí que en los momentos que más oscura parece la vida es cuando debemos sacar lo mejor de nosotros y demostrar que estamos hechos.*

*Tú y mamá son las personas que me inspiraron a estar donde ahora me encuentro, nada de esto hubiera pasado sin la formación que los dos me dieron.*

*Siempre en mi corazón papá y mamá.*



## Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, a mi familia, en especial a mis padres, Alina Rodríguez Ramírez y William Macías Sandoval, el apoyo de los dos fue vital para culminar este trabajo, algún día espero poder devolver con creces todo el amor y tiempo que me han brindado, soy afortunada de ser hija de dos grandes personas como ustedes; no podía dejar de nombrar tampoco a mi mamá putativa, Sandra Bing Zaremba quien también estuvo a mi lado de forma incondicional en este proceso, a mis compañeros de laboratorio en especial a Keile Bruges por la paciencia que tuvo para enseñarme cada proceso, cada ensayo, claro está también a la Profesora Martha Bustos por su guía y confianza depositada, al igual a la Profesora Consuelo Díaz y el Profesor Carlos Collazos quienes con sus conceptos también hicieron parte vital de este trabajo.

No podía tampoco dejar a un lado a mi amado Club Medusas, cada entrenamiento, cada campeonato me hacía regresar con la mente despejada para continuar en el largo camino de este trabajo de investigación, Susana, Lucia, Pedro y Carolina gracias.

A mis amigos Jenifer, Mateo, Deborah, Fernando, Julián, Juan Diego, Daniel, Laura, Catherine, Francisca y Pedro Felipe quienes nunca perdieron la fe en mi por más largo que pareciera el camino, siempre me apoyaron brindándome momentos de felicidad o un abrazo cuando más lo necesitaba.

Tía María para ti también hay un lugar especial en esta página, gracias porque fuiste más allá exigiéndome cada día, parte de mi disciplina la debo a ti, gracias Profe.

Falta un agradecimiento especial a mi prima Elaine que más que una prima es mi hermana, mi gran amiga, tú me diste el mejor regalo; mi Sobrino Martín quien con sus masajes, risas y abrazos también ayudó a alimentar mi alma cuando necesitaba un nuevo impulso.

Mamá ya podemos decirlo: ¡La Hicimos!



# Resumen

El IRCA es el índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano reglamentado en Colombia mediante la resolución 2115 de 2007, en él se califica el nivel de riesgo mediante la evaluación de 23 parámetros, sin embargo no incluye otras sustancias que también son de interés para la Salud pública, las cuales si consideraría un ensayo de toxicidad. En este trabajo se analizaron en 25 muestras de agua potable provenientes de acueductos ubicados en la sabana de Bogotá, parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, y se utilizaron bioensayos para toxicidad aguda con *D. magna* y toxicidad crónica con *S. Capricornutum*, En cuanto a los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, se halló un incumplimiento del 33% de las muestras en calcio, 52% en Coliformes totales, 17% en cloro residual libre y 8% de las muestras en pH, del total de muestras evaluadas, y para la evaluación de toxicidad utilizando bioensayos, el 100% de la muestras dieron respuesta positiva a toxicidad crónica con *S. Capricornutum* y el 32% de toxicidad aguda con *D. magna*. Estas respuestas tóxicas posiblemente se dan por la presencia de sustancias químicas, como metales pesados o compuestos orgánicos como los plaguicidas, los cuales no se están analizando.

Se utilizó la metodología DELPHI para elaborar una propuesta de inclusión de la toxicidad en el IRCA, modificando los puntajes de riesgo actuales, y al aplicarla sobre las mismas muestras analizadas, se mantiene en 4% el total de muestras con riesgo alto, en 52% las muestras en riesgo medio, pero las que estaban sin riesgo, del 44% cambian todas a riesgo bajo, esto debido a que, basados en los criterios del panel de expertos, al incluir la toxicidad todas las muestras dieron respuesta positiva a toxicidad crónica con *S. Capricornutum*, por lo tanto van a dar un riesgo bajo.

Los resultados de la investigación muestra que aunque con la evaluación actual del IRCA se está haciendo un seguimiento a la calidad del agua potable que consume la población, la posibilidad de que hayan otras sustancias que generen algún riesgo no se está incluyendo y hacer evaluaciones individuales para diferentes sustancias será dispendioso y costoso, y en la práctica los acueductos que hagan esa evaluación serán pocos, sin embargo los bioensayos no permiten evaluar en conjunto esas sustancias y sirven como indicadores.

**Palabras clave:** Toxicidad, Bioensayos, ICA's, IRCA y agua potable.



## Abstract

The IRCA is the water quality risk index for human consumption regulated in Colombia through resolution 2115 of 2007, which grades the level of risk by evaluating 23 parameters, but the index does not include other substances that are also of interest for Public Health, which would consider through a toxicity test. In this work, 25 samples of drinking water from aqueducts located in the Bogota savanna were analyzed, physicochemical and microbiological parameters, and bioassays were used for acute toxicity with *D. magna* and chronic toxicity with *S. Capricornutum*. For the physicochemical and microbiological tests, found a gap of 33% of the samples in calcium, 52% in total coliforms, 17% in free residual chlorine and 8% of the samples in pH, of the total samples evaluated, and for the evaluation of toxicity by bioassays, 100% of the samples gave a positive response to chronic toxicity with *S. Capricornutum* and 32% acute toxicity with *D. magna*. These toxic responses are probably due to the presence of chemicals, such as heavy metals or organic compounds such as pesticides that are not being analyzed.

The DELPHI methodology was used to elaborate a proposal for the inclusion of toxicity in the IRCA, modifying the current risk scores, this proposal when applied to the same samples analyzed getting that the total of high risk samples is maintained in 4%, in 52% the samples at medium risk, but those that were without risk, of 44% all change at low risk, this because, based on the criteria of the panel of experts, when including the toxicity all the samples gave positive response to chronic toxicity with *S. Capricornutum*, therefore they will give a low risk.

The results of the research show that although the current evaluation of the IRCA that is monitoring the quality of the drinking water consumed by the population, but there are the possibility substances that generate some risk is not being included and whose individual evaluations will be wasteful and expensive, and in practice the aqueducts that make that evaluation will be few, however the bioassays do not allow to evaluate these substances together and serve as indicators.

**Keywords: Toxicity, bioassays, ICA's, IRCA and drinking water.**

# Contenido

	Pág.
Resumen .....	IX
Lista de figuras.....	XV
Lista de tablas .....	XVI
Lista de ecuaciones .....	XVII
Lista de Reportes .....	XVIII
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>19</b>
■ <b>OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.1.1 Evaluar la calidad microbiológica y fisicoquímica de agua potable .....	21
1.1.2 Evaluar la calidad toxicológica mediante el uso de bioensayos.....	21
1.1.3 Comparar los resultados del IRCA con y sin Ensayos toxicológicos, para evaluar si existe una diferencia en términos de riesgo y de acuerdo a esto hacer una propuesta. ....	21
■ <b>JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>23</b>
2.1 “Evaluación de la calidad toxicológica y microbiológica de la fuente de abastecimiento del Municipio de Agua de Dios – Cundinamarca (Garzón, 2002)”.....	27
2.2 Drinking Water Disinfection Byproducts: Review and Approach to Toxicity Evaluation (Boorman et.al., 1999): .....	28
2.3 Selection of a bioassay battery to assess toxicity in the affluents and effluents of three water-treatment plants (Bohorquez-Echeverry., et al., 2012):.....	29
2.4 Assessment of source water contamination by estrogenic disrupting compounds in China.(Jiang., et al., 2012) :.....	29
2.5 Evaluación de <i>Lactuca Sativa</i> y <i>Selenastrum Capricornutum</i> como indicadores de toxicidad en Aguas. (Bohorquez & Cáceres, 2002): .....	30
2.6 Implementación de un sistema de alerta de riesgo toxicológico utilizando <i>Daphnia Pulex</i> para la evaluación de muestras ambientales. (Quintero, 2010): .....	31
2.7 Empleo de los ensayos con plantas en el control de contaminantes tóxicos ambientales (Torres, M., 2003):.....	32
2.8 Aplicación de Bioensayos en la medición de toxicidad por metales pesados en fuentes superficiales de agua para consumo humano. (Cáceda, 2011):.....	32
2.9 Inspección preliminar de algunas características de toxicidad en el agua potable domiciliaria (SILVA et al, 2012):.....	33
2.10 Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research (RICHARDSON et al, 2007): .....	33
2.11 Assessing toxicity of drinking water contaminants: an overview (NEAL, 1990): 34	34
2.12 Drinking water toxicity in health and diseases (MANDOUR, 2013):.....	34
■ <b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>37</b>

3.1	Índices de Calidad del Agua .....	37
3.2	Índice De Riesgo De Calidad De Agua Para Consumo Humano - IRCA.....	43
3.1	Bioensayos .....	49
3.1.1	Ensayo de toxicidad aguda por <i>Daphnia magna</i> con tiempo de exposición de 48 horas .....	52
	Organismos de prueba:.....	53
3.1.2	Ensayo de inhibición por <i>Selenastrum capricornutum</i> con tiempo de exposición de 72 horas .....	55
	Organismos de prueba.....	56
<b>■</b>	<b>PROCEDIMIENTO .....</b>	<b>57</b>
4.1	Descripción de muestras .....	57
4.1	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS.....	59
4.2	BIOENSAYOS .....	60
4.2.1	Ensayo de toxicidad aguda por <i>Daphnia magna</i> con tiempo de exposición de 48 horas .....	60
4.2.2	Ensayo de inhibición por <i>Selenastrum capricornutum</i> con tiempo de exposición de 72 horas .....	62
4.3	Cálculo del IRCA .....	64
4.4	Formulación de la propuesta de modificación del IRCA .....	65
<b>■</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
5.1	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS.....	67
5.2	IRCA.....	68
5.3	RESULTADOS BIOENSAYOS .....	69
5.3.1	Toxicidad aguda con <i>Daphnia magna</i> .....	69
5.3.2	Toxicidad crónica con <i>S. capricornutum</i> .....	70
<b>■</b>	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
6.1	PROPUESTA DE INCLUSIÓN DEL PARÁMETRO TOXICIDAD TOTAL DENTRO DEL IRCA MEDIANTE METODOLOGÍA DELPHI .....	80
6.1.1	Escogencia de parámetros a modificar (ejercicio individual).....	80
6.2	Aplicación <i>metodología Delphi</i> para la evaluación de inclusión del parámetro Toxicidad.....	85
6.2.1	Generalidades.....	85
6.2.2	Selección de Expertos.....	86
6.2.3	Análisis de la información Cualitativa obtenida.....	87
6.2.4	Análisis de la información Cuantitativa obtenida.....	88
6.2.5	Propuesta final Panel de Expertos para la reformulación del puntaje de Riesgo por parámetro en el IRCA.....	91
<b>■</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>■</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>97</b>
<b>■</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>103</b>
A.	Anexo: Reportes ensayos Toxicidad Crónica con <i>S. capricornutum</i> .....	103
B.	Anexo: Reportes Ensayos con <i>Daphnia magna</i> .....	111
C.	Anexo: Evaluación de riesgo con el actual puntaje del IRCA. ....	113

<b>D. Anexo: Modelos probabilísticos para corroborar la dependencia de la Toxicidad ante otros Parámetros medidos.....</b>	<b>115</b>
<b>E. Anexo: Propuesta final de modificación del IRCA con la inclusión de bioensayos. ....</b>	<b>119</b>

# Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Tendencia del IRCA en Colombia para el periodo comprendido entre los años 2007 - 2011 .....	46
Figura 2 Tendencia del IRCA en Colombia consolidado 2007-2015. ....	47
Figura 3 Esquema secuencial de respuestas a diferentes escalas de exposición a un polutante. ....	51
Figura 4 <i>Daphnia magna</i> . ....	54
Figura 5 <i>Selenastrum capricornutum</i> vista al microscopio. ....	56
Figura 6 Diagrama de flujo de la Prueba de toxicidad aguda con <i>Daphnia magna</i> . ....	61
Figura 7 Diagrama de flujo ensayo <i>S. capricornutum</i> .....	63

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 : Parámetros evaluados en el IRCA.....	26
Tabla 2 : Clasificación de Índices de calidad de agua.....	39
Tabla 3 : Fórmulas de agregación para el cálculo de índices de calidad de agua a partir de subíndices .....	42
Tabla 4 : Criterios de riesgo para parámetros de agua potable en Colombia en 1998. .	44
Tabla 5 : Clasificación de nivel de riesgo en Salud IRCA. Art. 15 Resolución 2115 de 2007 .....	45
Tabla 6: Distribución de muestras según su nivel de complejidad de acueducto .....	57
Tabla 7: Tabla de ensayos realizados según protocolo APHA.....	59
Tabla 8 Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados a las 25 muestras analizadas .....	67
Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos incluidos en el IRCA que no cumplen con la Res. 2115/2007 en Porcentaje .....	68
Tabla 10: Resultados del IRCA básico y completo y nivel de riesgo.....	68
Tabla 11: Reporte de los ensayos de toxicidad aguda con <i>D. magna</i> (48 Horas) para las 25 muestras seleccionadas. ....	69
Tabla 12 : Reporte de los ensayos de toxicidad crónica con <i>S. Capricornutum</i> (72 Horas) .....	70
Tabla 13 : Resumen de los resultados para el ensayo de toxicidad crónica con <i>S. capricornutum</i> (72 Horas).....	71
Tabla 14: Resumen de los resultados para el ensayo de toxicidad aguda con <i>D. magna</i> (48 Horas) para las 25 muestras seleccionadas. ....	71
Tabla 15 : Selección de parámetros y modificación de puntaje de riesgo propuesta para incluir en ejercicio Delphi (Encuesta). ....	82
Tabla 16 Resultados del ejercicio individual para ser incluido en el método Delphi. ....	84
Tabla 17 Listado de parámetros actuales propuestos por el panel de expertos para modificación. ....	89
Tabla 18 Selección final de parámetros para modificación de su actual puntaje de riesgo en el IRCA.....	90
Tabla 19 Expertos del panel que aprueban la implementación de los bioensayos como parámetros Toxicológicos del IRCA.....	90
Tabla 20 Propuesta final de puntajes de riesgo incluyendo los dos parámetros toxicológicos (Bioensayos) en el IRCA .....	92
Tabla 21 Resumen Evaluación Propuesta IRCA .....	93

# Lista de ecuaciones

Ecuación 1 Cálculo de IRCA por muestra.....	45
Ecuación 2 Cálculo de IRCA mensual .....	45

## Lista de Reportes

	Pág.
Reporte 1 Ensayos montados el 11.08.15.....	103
Reporte 2 Ensayos montados el 02.12.15.....	104
Reporte 3 Ensayos montados el 17.11.15.....	105
Reporte 4 Ensayos montados el 12.01.16.....	106
Reporte 5 Ensayos montados el 09.02.16.....	107
Reporte 6 Ensayos montados el 17.05.16.....	108
Reporte 7 Ensayos montados el 17.04.17.....	109
Reporte 8 características al inicio y fin del ensayo con <i>S. capricornutum</i> .....	110
Reporte 9 Condiciones iniciales y finales de los ensayos de mortalidad con <i>D. magna</i> .....	111
Reporte 10 Lecturas ensayo de mortalidad con <i>D. magna</i> a las 48 hrs.....	112
Reporte 11 Reporte evaluación IRCA.....	113
Reporte 12 Matriz de correlación de parámetros analizados.....	115
Reporte 13 Salidas en R del modelo de regresión aplicado a la toxicidad según resultados de mortalidad con <i>D. magna</i> .....	116
Reporte 14 Salidas en R del modelo de regresión aplicado a la toxicidad según resultados de Inhibición con <i>S. capricornutum</i> .....	117
Reporte 15 Resultados Prueba ANOVA (Varianza) para modelos con la totalidad de los parámetros teniendo como variables dependientes la Mortalidad de <i>D. magna</i> y la Inhibición de <i>S. capricornutum</i> .....	118
Reporte 16 Resumen de valores asignados y propuesta seleccionada según método Delphi.....	119
Reporte 17 Tabla de valores evaluados con puntajes de riesgo de la propuesta resultado Delphi.....	120
Reporte 18 Tabla de valores evaluados con puntajes de riesgo del ejercicio individual para responder la encuesta del método Delphi.....	120
Reporte 19 Modelo de la encuesta usada para realizar el método Delphi.....	121

# INTRODUCCIÓN

El Riesgo es conocido como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas, en otras palabras, es el producto de la amenaza por la vulnerabilidad y estos dos componentes se pueden descomponer, ya que la vulnerabilidad a su vez es el resultado de relacionar la exposición, la susceptibilidad y la resiliencia. (UNISDR, 2009).

El reto y la responsabilidad de reducir los riesgos en la medida de lo posible para vivir una vida larga y saludable involucran a las personas o poblaciones y a su vez a los gobiernos de los mismos. Una muestra de lo anteriormente dicho es el uso del cinturón de seguridad, el cual es un acto individual que tiene por objeto reducir el riesgo de lesiones; sin embargo, aprobar una ley que haga obligatorio el uso del cinturón es una medida del gobierno en beneficio de la población (OMS, 2002).

En cuanto al componente sanitario, el significado de la palabra riesgo si bien va ligado de igual forma a la probabilidad de un resultado adverso (en este caso a contraer una enfermedad o una afección de salud), depende de un mayor número de factores como lo es la proyección poblacional, las políticas de estado y la regulación de las mismas, acceso a medicinas y servicios de calidad (incluyendo servicios básicos domiciliarios y los servicios médicos), o simplemente de la cultura de prevención que tenga la población (OMS, 2002).

Para ello es necesario realizar la evaluación de riesgos ambientales en la salud, con el fin de identificar o determinar el peligro latente (amenaza) y con ello reducir el riesgo general. Una forma de hacer estimar dichos riesgos ambientales es mediante el uso de regulaciones jurídicas, por ejemplo, en el año 2007, el Ministerio de la Protección Social expidió el decreto 1575, mediante el cual establece el Sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por consumo de agua potable. Este decreto fue reglamentado en la resolución 2115 de 2007 donde se indican las características fisicoquímicas y microbiológicas que se deben evaluar, los instrumentos básicos de vigilancia y control y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo

humano. Como instrumento de control se estableció el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano más conocido como IRCA, el cual se calcula teniendo en cuenta 23 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos básicos que debe cumplir el agua potable, asignándoles un puntaje a cada uno, y finalmente el resultado se clasifica dentro de los diferentes rangos: Entre 80,1% - 100% Inviabile Sanitariamente; Entre 35,1% - 80% Riesgo Alto, Entre 14,1% - 35% riesgo medio, entre 5,1% - 14% Riesgo Bajo y entre 0% - 5% Sin Riesgo.

Dentro de los parámetros incluidos en el IRCA no se consideran diversas sustancias químicas, como subproductos de desinfección diferentes a los trihalometanos, plaguicidas, compuestos orgánicos sintéticos, residuos de medicamentos, entre otros, las cuales pueden estar presentes en el agua potable (MARRUGO, 2016; IARC, 2004; CAMPO, 2003; NEAL, 1990; STOJDA, 1985). Medir individualmente todas las sustancias que pueden estar en el agua resultaría, primero muy costoso y difícil por las tecnologías analíticas que se requieren y que no están disponibles en Colombia, y segundo no permitirían ver el posible efecto sinérgico (unión o interacción de dichas sustancias), que si permiten los bioensayos como la evaluación la inhibición de crecimiento con *S. capricornutum* y la evaluación de la mortalidad con *D. magna*.

En esta tesis se hizo una evaluación fisicoquímica, microbiológica y de toxicidad con los dos bioensayos mencionados anteriormente, a 25 muestras de agua potable provenientes de la sabana de Bogotá, y se formula una propuesta para evaluar la potencial inclusión de la toxicidad en el IRCA, teniendo en cuenta el impacto para la salud de la presencia de sustancias químicas que no se evalúan IRCA.

En concordancia con lo anterior y teniendo en cuenta los estudios preliminares de ecotoxicidad en Colombia surge el siguiente interrogante: ¿La evaluación de la toxicidad se podría incluir dentro del cálculo del IRCA para evaluar el riesgo en el consumo de agua potable?

# **OBJETIVOS**

Evaluar la calidad fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de muestras de agua potable, con el fin de hacer una propuesta para su inclusión dentro de los parámetros del IRCA (Índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano) de la normativa colombiana.

## **1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**1.1.1** Evaluar la calidad microbiológica y fisicoquímica de agua potable

**1.1.2** Evaluar la calidad toxicológica mediante el uso de bioensayos.

**1.1.3** Comparar los resultados del IRCA con y sin Ensayos toxicológicos, para evaluar si existe una diferencia en términos de riesgo y de acuerdo a esto hacer una propuesta.



## JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

Para septiembre del año 2000, la ONU planteó lo que se conoce como los ocho (8) objetivos de desarrollo del milenio (ODM) durante la cumbre del milenio de las Naciones Unidas. En dicha cumbre los líderes del mundo acordaron establecer objetivos y metas claras con plazos establecidos para contestar a la responsabilidad de los países en desarrollo de mejorar sus índices en derechos humanos, buen gobierno y democracia<sup>1</sup>, dichos objetivos fueron nombrados de la siguiente forma:

- Objetivo 1: Erradicar la pobreza extrema y el hambre.
- Objetivo 2: Lograr la enseñanza primaria universal.
- Objetivo 3: Promover la igualdad entre los sexos y el empoderamiento de la mujer.
- Objetivo 4: Reducir la mortalidad de los niños menores de 5 años.
- Objetivo 5: Mejorar la salud materna.
- Objetivo 6: Combatir el VIH/SIDA, la malaria y otras enfermedades.
- Objetivo 7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.
- Objetivo 8: Fomentar una alianza mundial para el desarrollo.

Enmarcado en el objetivo 7 de los ODM (objetivos del milenio) se encuentra la meta 7C: “Reducir a la mitad, para el 2015, la proporción de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento”. Dicho de otra forma, responder a las necesidades de la población humana sin destrozarse la capacidad del medio ambiente para cubrir las mismas a largo plazo. (CEPAL, 2011) En concordancia para cumplir el objetivo fue necesario implementar nuevas políticas a nivel de países en vía de desarrollo para asegurar la meta, En Colombia dichas estrategias fueron plasmadas mediante el CONPES 91 de 2005 actualizado posteriormente por el CONPES 140 de 2011. Ambos documentos emitidos por el DNP (Departamento Nacional de Planeación), pusieron como meta reducir a la mitad para el año 2015 el porcentaje de personas sin acceso sostenible a agua potable y servicios de saneamiento básico (alcantarillado), esto significaría tener un cubrimiento o

---

<sup>1</sup> [http://www.cinu.mx/minisitio/ODM8/los\\_8\\_objetivos\\_del\\_milenio/](http://www.cinu.mx/minisitio/ODM8/los_8_objetivos_del_milenio/)

24 Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable para consumo humano en Colombia.

---

cobertura de acueducto del 99% para zonas urbanas y del 78% en áreas rurales (DNP, 2014) en Colombia.

Ahora, si bien es cierto que el gobierno colombiano encamino un esfuerzo alto tanto de su personal técnico como de sus recursos pues según la subdirección de desarrollo urbano del DNP entre los años 2011-2014 se invirtieron 500 mil millones de pesos por año para cobertura de acueductos aproximadamente, para cumplir con la meta propuesta en los CONPES 91/05 y 140/11, eso significa un incremento en el presupuesto en unos 150 mil millones por año comparado con el presupuesto invertido entre los años 2007-2010.

Como resultado de estas políticas y a pesar que se ha incrementado la cobertura en el suministro de agua en Colombia, la calidad del agua se ha denominado como inadecuada (MAVDT, 2009), es tal la situación que el Ministerio de Desarrollo Económico (ahora llamado Ministerio de Comercio, Industria y Turismo), reportó que 10 millones de habitantes no cuentan con servicio de acueducto, 16 millones no poseen alcantarillado, 27 millones no toman agua apta para consumo humano, y en cerca de 900 municipios se consume agua sin el adecuado tratamiento para consumo humano, lo cual evidencia una situación bastante preocupante pues estas cifras muestran que sólo un 60% de la población colombiana tiene acceso a agua potable aun cuando el gobierno ha implementado políticas para ampliar el cubrimiento como ya se había dicho (PORTAFOLIO, 2014).

Después de todos estos datos surge el interrogante si realmente la cobertura es la mejor variable para medir el acceso de agua potable, pues el hecho que exista el suministro no implica que el agua que llega a las viviendas sea estrictamente potable. Según la organización mundial de la salud el agua apta para el consumo humano no debe significar ningún riesgo sanitario para quienes la consumen, esto quiere decir que la presencia de cualquier agente biológico o sustancia química sin importar su origen, que provoque un efecto nocivo sobre la salud hará que esta agua sea catalogada como inapropiada para su consumo (OMS, 2004). Esto implica no sólo un adecuado tratamiento de potabilización sino además que la fuente de abastecimiento para consumo de agua cuente con características adecuadas, sin embargo, los vertimientos no controlados hacen que la contaminación química como microbiológica crezca día a día limitando dichas fuentes y la calidad de agua de las mismas.

Esto concuerda con el Diagnóstico realizado por el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial – hoy llamado Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – (MAVDT,2009) para el país, teniendo como base los datos obtenidos por el IDEAM en 2157 monitoreos realizados durante los años 2005 a 2008, en los cuales el ICA (Índice de Calidad Ambiental) mostró que el 1% de los puntos de monitoreo presentaron una calidad muy mala, el 53% calidad mala, y solo el 4% presentan una calidad aceptable. En total, el 95% de los sitios presentaron una calidad entre regular y mala, lo que evidencia que las corrientes superficiales están y continúan siendo sometidas a una degradación de su calidad ambiental.

Con base en este marco de referencia, y teniendo en cuenta que la calidad fisicoquímica del agua, al igual que la calidad microbiológica puede originar problemas de salud, es importante asegurar que esta contaminación no se presente ya que puede generar potenciales efectos tóxicos y/o cancerígenos para la población, ahora es necesario que los parámetros establecidos para dicha evaluación de calidad se encuentren en la cantidad y/o concentración requerida. Un ejemplo de lo dicho con anterioridad es el caso de plaguicidas, hidrocarburos aromáticos polinucleares o trihalometanos, o compuestos inorgánicos como los iones metálicos que causan disrupciones metabólicas en el hombre. Para asegurar la no ocurrencia de posibles inconvenientes de salud pública las normativas tanto de agua potable como de agua para vertimientos deben especificar las concentraciones permisibles dependiendo del uso (consumo) o disposición (vertimiento), en el caso del agua para consumo humano, para el año 2007 en Colombia el Ministerio de la Protección Social haciendo uso de sus facultades expide el decreto 1575 de mayo del año en mención, mediante el cual establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por consumo (a excepción del agua envasada) señalando características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para cumplir con la calidad del agua. En concordancia con lo anterior el ministerio delega obligaciones de vigilancia y control; y a raíz de ello se genera la en la resolución 2115 de 2007 mediante la cual el ministerio de protección social junto con el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial de entonces regulan y formulan el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano más conocido como IRCA.

En el Artículo 13 de la resolución 2115 de 2007 se plantea como instrumento para garantizar la calidad del agua para consumo humano, el uso del Índice de Riesgo de la

26 Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable para consumo humano en Colombia.

---

Calidad de Agua para Consumo Humano (IRCA) en el cual se asigna un puntaje de riesgo a cada característica física, química y microbiológica que no cumple los valores aceptables establecidos en la Resolución, según la tabla 1,

Tabla 1 : Parámetros evaluados en el IRCA.

<b>Característica</b>	<b>Puntaje de Riesgo</b>
Color Aparente	6
Turbiedad	15
pH	1,5
Cloro Residual Libre	15
Alcalinidad Total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza Total	1
Sulfatos	1
Hierro Total	1,5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio (Al+3)	3
Fluoruros	1
COT	3
Coliformes Totales	15
<i>Escherichia Coli</i>	25
Sumatoria de puntajes asignados	100

Elaboración: Propia; Fuente: Resolución 2115 de 2007

Sin embargo aun cuando se evalúan 20 parámetros fisicoquímicos y 2 microbiológicos mediante el cálculo del IRCA, el índice no tiene en cuenta los efectos sinérgicos que puede generar las concentraciones admisibles de los diferentes parámetros al interactuar entre ellos, ni los efectos toxicológicos de otras sustancias que si bien no están consideradas en la formulación del índice si se encuentran en la resolución como apartes importantes para evitar problemas de salud pública, tal es el caso de Cobre, Níquel, Plomo, Selenio, Mercurio, Trihalometanos, Hidrocarburos aromáticos policíclicos entre otros (Resol. 2115, 2007) . Una de las formas más usadas para evaluar dichos efectos toxicológicos es el uso de los bioensayos, pues estos indican mediante cambios fisiológicos, mortalidad y tasa de crecimiento y/o natalidad como respuesta a la presencia de sustancias que pueden tener

potenciales efectos nocivos sobre la salud de una población (Metcalf & Eddy, 1995 ; Neal, 1990).

Algunos estudios realizados no sólo en Estados Unidos sino en muchos otros países como China, Perú y Colombia han comprobado la importancia de la evaluación del parámetro de toxicidad mediante el uso de bioensayos en muestras de agua para diferentes disposiciones; a continuación, algunos estudios:

## **2.1 “Evaluación de la calidad toxicológica y microbiológica de la fuente de abastecimiento del Municipio de Agua de Dios – Cundinamarca (Garzón, 2002)”:**

En este trabajo, la autora Claudia Garzón Martínez orientó el estudio a la evaluación del agua de consumo que se suministra al municipio de Agua de Dios, cuya fuente u origen principal era el río Bogotá. Los resultados mostraron que aunque el municipio contaba con una planta de tratamiento y los reportes de salud no mostraban una relación directa entre la morbilidad y la posible contaminación química del agua de consumo, fue posible mostrar la presencia de toxicidad en las muestras de agua lo cual podría generar riesgos de salud para la comunidad.

El análisis de los datos del tratamiento de depuración de las aguas del río Bogotá, mostró que existen compuestos capaces de generar una respuesta tóxica la cual va disminuyendo con cada una de las etapas del proceso del tratamiento. El trabajo enfatiza en la remoción de materia orgánica ( $\approx 55\%$ ), detergentes ( $\approx 60\%$ ), y sólidos totales ( $\approx 35\%$ ). Igualmente, se señala que el agua en el sistema de distribución carece de cloro residual libre, y en algunos casos se observaron altas concentraciones de nitratos, amonio, calcio, y DQO, lo que podría contribuir a la formación de trihalometanos durante el proceso de desinfección.

Los resultados de los bioensayos mostraron ser una herramienta importante en la evaluación de la calidad toxicológica de las muestras de agua, así como identificar el nivel trófico más susceptible de la cadena trófica donde se produce el efecto. El uso de una batería de prueba con diferentes organismos, mostró la utilidad de esta herramienta cuando existe una mezcla de compuestos tóxicos, dado que cada organismo responde de manera diferente. En el estudio, *H. attenuata* mostró la mayor sensibilidad, seguida por *L. sativa* y *S. capricornutum*, mientras que la *D. magna* no reveló ningún tipo de respuesta a las muestras evaluadas.

De esta forma y teniendo en cuenta el punto de vista toxicológico los resultados del estudio tanto del afluente como el efluente de la planta de potabilización mostró la presencia de compuestos no determinados cuyas características tóxicas pueden constituir un riesgo potencial, que si bien no desencadenarán un evento tóxico agudo, a largo plazo puede tener efectos sobre la salud de la población.

## **2.2 Drinking Water Disinfection Byproducts: Review and Approach to Toxicity Evaluation (Boorman et.al., 1999):**

Básicamente este artículo es un estado del arte sobre la exposición humana ante agentes toxicológicos relacionados con subproductos de desinfección (DBPs) en Estados Unidos desde 1974, cuando el congreso de dicho país aprobó la ley de agua potable.

Los autores resaltan que por más de 20 años la población ha sido expuesta a sustancias cancerígenas como lo son el cloroformo y los trihalometanos (THM), Cloro presentes en el agua potable (o agua para consumo humano) y que muchas veces hacen parte del tratamiento de potabilización de la misma.

De igual manera también citaron una investigación de 5 años financiada por la agencia de protección de medio ambiente de los Estados Unidos (EE.UU.EPA) en la cual durante 2 años se trabajó con bioensayos en roedores (Ratones) y Peces, encontrando como resultado datos toxicocinéticos en los subproductos de desinfección del agua potable (SPD), lo cual hace pensar si los procesos de potabilización de agua realmente hacen que esta sea apta para el consumo humano.

### **2.3 Selection of a bioassay battery to assess toxicity in the effluents and effluents of three water-treatment plants (Bohorquez-Echeverry., et al., 2012):**

La meta del estudio fue evaluar el efecto biológico en ecosistemas y en humanos de agentes contaminantes en el agua de 3 planta potabilizadoras, para ello el objetivo principal fue definir la batería de bioensayos más indicada para poder evaluar toxicidad en agua potable se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: información anterior de aplicación de bioensayos, características morfológicas, número de organismos por réplica, frecuencia de observación, volumen de contenedores de prueba, condiciones ambientales de prueba, facilidad de análisis estadístico y diferentes niveles de la cadena trófica. Después de evaluar lo anteriormente nombrado se llegó a la conclusión de que los cinco organismos más aptos para montar la batería eran: *Lactuca sativa*, *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Daphnia magna*, *Hydra attenuata* y *Photobacterium leighnathi*.

Como conclusión del estudio se determinó que *H. attenuata*, *P. subcapitata* y *P. leiognathi* fueron los organismos más eficaces para detectar la toxicidad en los afluentes y *D. magna*, *P. subcapitata* y *P. leiognathi* en los efluentes.

### **2.4 Assessment of source water contamination by estrogenic disrupting compounds in China.(Jiang., et al., 2012) :**

El artículo en general habla sobre los estudios realizados en los 6 principales ríos de China especialmente en el río Yangtze, tomando un total de 23 muestras para analizar el efecto de perturbación estrogénica o disrupción endocrina de contaminantes en agua potable. Para llevar a cabo el análisis se realizó bioensayos con dos tipos diferentes de levadura híbrida, obteniendo como resultado alta actividad estrogénica para los compuestos conocidos como E2, EE2 y 4-NP, además de ello, de las 23 muestras se tomaron 16 para realizar estudios y ensayos con mediante cromatografía espectrometría la cual arrojó otras sustancias además de las ya mencionadas como lo son estriol (E3), dietilestilbestrol (DES) y estrona (E1) los cuales representan un 39% de la actividad estrogénica del conjunto total de sustancias encontradas.

Como conclusión del estudio los autores aseguran que el trabajo con levaduras en bioensayos puede ser útil para el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de agua y evaluación de riesgos medioambientales aplicando un sistema de alertas tempranas respecto a la presencia de los compuestos en mención.

## **2.5 Evaluación de *Lactuca Sativa* y *Selenastrum Capricornutum* como indicadores de toxicidad en Aguas. (Bohorquez & Cáceres, 2002):**

El objetivo de este estudio fue comparar la sensibilidad de *S. capricornutum* con el ensayo de *Lactuca sativa* y seleccionar el mejor indicador de toxicidad.

Para este fin, se determinaron como puntos finales, efectos de estimulación o inhibición sobre el crecimiento de las células algales y las semillas de lechuga. Se determinó la sensibilidad de cada organismo frente a Zn como tóxico de referencia para homologar los resultados entre *S. capricornutum* y *L. sativa*. En cuanto para la evaluación de la sensibilidad de los indicadores, se seleccionaron dos muestras de agua en el río Bogotá y otra en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salitre. Los resultados indicaron que ambos modelos presentaron respuestas similares, lo cual podría atribuirse a la concentración de materia orgánica presente en las muestras.

Algo importante para resaltar es que, aunque *Lactuca sativa* y *Selenastrum capricornutum* no presentaron un efecto de inhibición en su crecimiento pueden estar alertando sobre problemas de eutrofización en las estaciones de muestreo evaluadas. Así pues, una de las grandes conclusiones de este estudio es la afirmación o recomendación de los bioensayos con modelos vegetales para la evaluación de efluentes industriales, pero aun así es necesario abarcar más niveles de la cadena trófica para poder hallar toxicidad en las muestras que se quieran tomar dado a que también es importante evaluar efectos de biomagnificación.

## **2.6 Implementación de un sistema de alerta de riesgo toxicológico utilizando *Daphnia Pulex* para la evaluación de muestras ambientales. (Quintero, 2010):**

El objetivo de esta investigación es la implementación de un sistema de alerta de riesgo toxicológico utilizando un microcrustáceo nativo del área de la sabana de Bogotá, la *Daphnia Pulex*, para determinar el índice de toxicidad de muestras ambientales y obtener una clasificación de efluentes industriales que permitan fortalecer los mecanismos de calidad y control ambiental sobre vertimientos.

Para llevar a cabo dicha implementación se realizaron pruebas de toxicidad de efluentes de industrias de curtiembres (proceso de curtido con cromo y proceso de ribera), industria inorgánica (planta cloro-soda), industria termoeléctrica (patio de cenizas) e industria galvanoplástica.

En concordancia con lo anterior cabe aclarar que para establecer las cargas tóxicas de los efluentes dependen no sólo de la concentración letal del vertimiento, sino del caudal aportado por éste y así implantar un índice toxicológico como una herramienta valiosa, poco costosa y efectiva para la ayuda, control, evaluación y clasificación no sólo de efluentes industriales vertidos, sino también de cuerpos de agua receptores (donde se realiza el vertimiento), permitiendo de esta forma que las entidades reguladoras ejecuten más fácilmente la creación de un mapa de ordenamiento territorial adecuado.

## **2.7 Empleo de los ensayos con plantas en el control de contaminantes tóxicos ambientales (Torres, M., 2003):**

En un comienzo la autora resalta la importancia del uso de bioensayos para evaluar toxicidad en el ambiente dado que, al crecimiento y desarrollo industrial y urbano, día a día aparecen nuevas sustancias cuyo efecto en nocivo en seres vivos no se ha evaluado. Además de lo anteriormente citado la Dra. María Torres señala las ventajas de los bioensayos diciendo que es un método de monitoreo rápido, confiable, simple y “costo efectivo”.

Después de esta pequeña introducción, la autora enfatiza en los bioensayos donde se utilizan seres vivos de origen vegetal, más específicamente habla del uso de *Lactuca Sativa* L y *Allium, Cepa* L. para la evaluación de toxicidad total aguda (tiempo de exposición de 72 a 120 horas), diciendo que mediante la raíz de las mismas se puede encontrar un valor rápido de EC50 en pruebas aplicadas a aguas naturales (ríos, lagos y pozos), Potables (agua de grifo, en general de consumo humano), Residuales domésticas (incluyendo lodos y lixiviados).

Aunque el artículo no muestra resultados de pruebas, se torna interesante dado a que resalta la importancia del uso de plantas para evaluar toxicidad en el ambiente más específicamente en el agua.

## **2.8 Aplicación de Bioensayos en la medición de toxicidad por metales pesados en fuentes superficiales de agua para consumo humano. (Cáceda, 2011):**

Antes de hacer la respectiva descripción de éste trabajo cabe resaltar que el mismo se realizó en un cauce peruano y fue desarrollado por un ingeniero colombiano graduado de Master en la universidad Nacional de Colombia.

Como se mencionó anteriormente el estudio consta de una evaluación del efecto tóxico potencial de metales pesados de una muestra de agua del río Santa (ubicado en la costa

norte peruana) en el crecimiento de raíces en *Allium Cepa* (Cebolla) y *Lactuca Sativa* (Lechuga).

Al finalizar los bioensayos, el autor recalca que para evaluar tanto Cromo (Cr) y Plomo (Pb) las cepas de Cebolla tienen mayor sensibilidad a dichos metales comparado con las semillas de lechuga y con estas últimas se debe trabajar sobre ensayos de monitoreo para un programa de alerta de calidad de agua sobre fuentes de abastecimiento.

## **2.9 Inspección preliminar de algunas características de toxicidad en el agua potable domiciliaria (SILVA et al, 2012):**

Los autores buscan afirmar a través del estudio que se presenta una alteración de las características básicas finales de agua potable de plantas de tratamiento al llegar a las redes de distribución y los tanques de almacenamiento esto mediante la evaluación de parámetros como la conductividad, el color, pH, turbiedad, aluminio, cloro residual y nitratos en un total de 26 muestras de agua potable de viviendas ubicadas en Bogotá y Soacha. Como conclusión se evidenció un deterioro en la calidad de agua domiciliaria debido a la presencia de sustancias o compuestos orgánicos en tanques y sobre todo en redes, se presumió que esto fue a causa de la formación de biopelículas o de la presencia de polímeros orgánicos principalmente aunque también se presentaron trazas de aluminio que son normales al ser remanentes de los coagulantes usados en tratamientos.

## **2.10 Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research (RICHARDSON et al, 2007):**

Los autores describen por medio del artículo la problemática que actualmente se tiene con los productos de desinfección o DBPs, los cuales se generan al reaccionar agentes de desinfección como el ozono, cloro, dióxido de cloro y cloraminas con sustancias de origen antropogénico, materia orgánica, bromuros y yoduros durante la potabilización del agua para consumo. Estos DBPs en revisiones hechas de estudios en los últimos 30 años han mostrado que se han identificado como cancerígenos al menos 85 de estos compuestos pero de los cuales sólo se regulan 75 en los Estados Unidos; esto genera la necesidad de estudiar más a fondo los THMs o trihalometanos que hacen parte del grupo de DBPs pues además los autores enfatizan en que el riesgo de contraer cáncer por estos agentes

aumenta también por exposición a agua donde se pueda contener o generar THMs como lo es el agua domiciliaria usada para baños, regaderas, duchas o en actividades deportivas como la natación.

### **2.11 Assessing toxicity of drinking water contaminants: an overview (NEAL, 1990):**

El autor mediante el trabajo expone la gravedad de contaminantes químicos presentes en agua para consumo en cuanto a problemas o efectos adversos en la salud; en el trabajo señala una serie de efectos epidemiológicos identificados con estos compuestos como el cadmio, cromo, mercurio y nitratos, los cuales también pueden ser evaluados mediante bioensayos en organismos animales por medio de los cuales se pueden identificar disruptores endocrinos, agentes cancerígenos hasta llegar a agentes productores de mutaciones (generadores de cambios genéticos).

### **2.12 Drinking water toxicity in health and diseases (MANDOUR, 2013):**

El estudio fue realizado en el estado de Dakahlia en Egipto donde se tomó un total de 80 muestras las cuales se distribuyen así: 73 muestras tomadas de grifo y 7 de agua mineral embotellada las cuales fueron expuestas a ensayos fisicoquímicos y bacteriológicos según los protocolos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Ministerio de Salud de Egipto (EMH) por sus siglas en inglés.

Los resultados de los anteriores ensayos se correlacionaron con potenciales compuestos de contaminación como subproductos de potabilización, haciendo evidente la necesidad de monitorear las redes por las cuales transita el agua potable ya que se indica presencia principalmente de TDS y TH los cuales se presumen se generaron en dichas redes.

Estos ejemplos ilustrados son una muestra de la necesidad de evaluar la inclusión de la toxicidad como un parámetro del IRCA, pues si bien como se ha resaltado en párrafos anteriores es importante calcular los parámetros ya establecidos, el índice carece de un método de evaluación de sustancias que producen efectos nocivos en la salud humana, éstos no necesariamente son contaminantes emergentes también pueden ser sustancia con efectos adversos ya conocidos (que al interactuar con otros componentes –sinergia-potencializan dichos daños), incluso algunos de ellos se encuentran nombrados en la resolución 2115 de 2007 pero que no hacen parte de los parámetros del Índice de Riesgo de Calidad de Agua para Consumo Humano en Colombia IRCA.

Es esto la razón principal de establecer la necesidad de una valoración a nivel técnico de la actual formulación del IRCA, como índice de riesgo de la calidad del agua para consumo en Colombia, por medio de la comparación de los valores de la actual estimación del IRCA, con evaluaciones que indiquen la presencia o no de agentes toxicológicos en las mismas muestras analizadas; Esto sin dejar a un lado el hecho que hay parámetros que se incumplen dentro de la normativa ya establecida por lo cual antes de realizar dicha evaluación es necesario establecer medidas para no dejar a un lado los mismo; para ello se plantea con ayuda de la metodología Delphi la corroboración de la propuesta de evaluación.



---

## MARCO TEÓRICO

### 3.1 Índices de Calidad del Agua

A lo largo de la historia de la ciencia se han buscado métodos o formas para cuantificar la evaluación de las diferentes investigaciones o estudios; encontrando como una solución los indicadores e índices mediante los cuales es posible dar un valor cuantitativo a una evaluación antes considerada netamente cualitativa mediante la medición de uno o más parámetros ponderados.

En la literatura se conoce como indicador a la magnitud numérica relacionada con un evento, situación o sustancia, que pone en evidencia la intensidad o evolución de los mismos ayudando así a establecer una posible explicación y predicción del fenómeno estudiado; en conclusión un indicador es la muestra cuantitativa que sirve para evaluar el cambio de una variable, un buen indicador debe ser claro, relevante con el objetivo de medición y debe suministrarse o recalcularse periódicamente (CORZO et al, 2007); este pueden reflejarse como una cifra absoluta, un porcentaje, un promedio u otras medidas estadísticas siempre y cuando conserve su validez, representatividad, confiabilidad, sensibilidad y eficiencia como características básicas de cualquier indicador.

No obstante, esto aún no permite o deja asimilar y entender claramente un fenómeno, estado o situación, pues si bien ya está cuantificada la variable o las variables continúa siendo una información fragmentada y separada por lo cual se debe unificar, integrar o sintetizar para llegar a un único valor con el cual se pueda expresar de una mejor manera lo que en realidad ocurre con el estado del fenómeno o característica estudiada. Para lograrlo esto se debe ponderar los valores de los indicadores, alcanzando dicho valor total que se denomina índice, y es este el que dará la información relevante sobre el problema en estudio (SABINO, 1996).

Por otro lado, existen muchas clases de índices, cuyas características y forma de ponderación varían dependiendo del análisis que se quiere realizar con ellos, encontrando así que según su diseño como anteriormente se mencionó, son usados en diferentes

ramas del conocimiento como la economía, sociología, Física, Química, Antropología, Biología, Ingeniería, entre otras.

En la Ingeniería civil y ambiental los índices son muy usados para evaluar la calidad de compuestos, materiales y medios; a este último pertenece el agua donde los ICA's (índices de calidad de agua) juegan un papel importante en la evaluación y toma de decisiones para evitar o subsanar contaminación de afluentes (agua cruda), agua potable, aguas servidas (contando sus cargas contaminantes al ambiente).

Un ICA o índice de calidad del agua puede ser representado como cualquier otro índice por un número, rango, descripción verbal (cualitativo), símbolo o color, este último generalmente depende de la severidad de la evaluación realizada; así se puede decir que la ventaja del uso de los ICA's radica en que la información puede ser explicada de una forma más fácil agilizando el análisis de situaciones donde se presenten problemas de contaminación como anteriormente se dijo, clasificando esta misma (contaminación) en excesiva, media, inexistente entre otros rangos que pueden diseñarse; convirtiéndose en una herramienta comunicativa o de transmisión de información que no sólo está estrechamente relacionada con la ingeniería ambiental y civil sino también con la biología, el saneamiento y hasta con la medicina (FERNÁNDEZ et al, 2005).

Los índices de calidad de agua están clasificados en 10 categorías orientadas al uso del recurso hídrico, a su vez estos 10 ítems están clasificados en 4 grandes grupos (BALL et al, 1980).

Tabla 2 : Clasificación de Índices de calidad de agua.

<b>Grupo</b>	<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>
<b>I</b>	<b><i>Los indicadores en la fuente</i></b>	Reportan la calidad generada por sensores en fuentes discretas
	<b><i>Los indicadores en un punto diferente a la fuente</i></b>	Reportan la calidad del agua generada por fuentes difusas
<b>II</b>	<b><i>Medidas simples como indicadores</i></b>	incluye muchos atributos y componentes individuales del agua, que pueden ser usados como indicadores de su calidad
	<b><i>Los indicadores basados en criterios o estándares</i></b>	correlacionan las medidas de calidad de agua con niveles estándar o normales
	<b><i>Los índices multiparámetro</i></b>	determinados por opiniones colectivas o individuales de expertos
	<b><i>Los índices multiparámetro empíricos</i></b>	establecidos por el uso de las propiedades estadísticas de las mediciones de calidad
<b>III</b>	<b><i>Indicadores para lagos</i></b>	especiales para lagos, lagunas y ciénagas
<b>IV</b>	<b><i>Indicadores de la vida acuática</i></b>	basados en relaciones de tolerancia de la biota acuática a presencia de contaminantes
	<b><i>Indicadores del uso del agua</i></b>	evalúa compatibilidad del agua con usos
	<b><i>Indicadores basados en la percepción</i></b>	determinados por opiniones de usuario o público

Fuente: realización propia con contenido tomado de (BALL et al, 1980, Recuperado en FERNÁNDEZ et al, 2005)

En diferentes países tanto los ICA's como los ICO's (índices de contaminación) son usados con frecuencia para monitorear cuerpos de agua y garantizar la calidad óptima dependiendo del uso, tal y como se explica en el grupo IV de la tabla 2; éstos a su vez son regulados por los diferentes institutos o ministerios de salud y medio ambiente; cada uno toma su diseño dependiendo de las prioridades o necesidades de la población; esto hace que los indicadores en cada índice varíen sin embargo, haciendo un símil la brújula apunta siempre hacia el norte y en caso de los ICA's, los indicadores o parámetros seleccionados para evaluar el estado de la calidad siempre están direccionados hacia garantizar que el agua no sea un agente o generador potencial de enfermedades como prioridad número 1, la segunda generalmente está enfocada a evitar daños en redes de distribución o recolección, puede decirse de alguna forma a escatimar recursos económicos a posibles reparaciones por daños de corrosión entre otros, como ya se desarrollará la idea más adelante.

En concordancia con lo anterior y contextualizando más las investigaciones realizadas en Colombia alrededor de los ICA's, La Universidad de Pamplona realizó un estudio detallado de identificación y comparación de índices de calidad de agua y contaminación a nivel global con el fin de crear un método de comparación de estos, publicando 4 tomos donde se expone los mecanismos de valoración, monitoreo, formulación y diseño de indicadores e índices y lo llamaron ICATEST; en el capítulo o tomo II enfatizan en los índices de calidad de agua.

Dentro del tomo II se habla sobre el mecanismo de diseño que es conocido como la *metodología de Delphi* por medio de la cual se describe o explica más a fondo cómo se formulan los índices, por lo cual ha llegado a ser la técnica más usada a nivel mundial por los distintos entes reguladores (ministerios de ambiente, salud e instituciones encargadas de salvaguardar el medio ambiente) como antes se había mencionado para el esquema o creación de índices de calidad multiparametros tal y como es señalado en el grupo II de indicadores de la tabla II además de dar sustento a las prioridades de elección de cada uno de esos parámetros como en párrafos anteriores se dijo.

Básicamente la *metodología de Delphi* consiste en la selección y asignación de factores de ponderación para 2 o más parámetros físicos, químicos o biológicos ( estas 3 clases son considerados como subíndices) y por sumatoria de estos encontrar un valor único para el índice, por medio del uso de juicios subjetivos de un panel de expertos, (ALBERTI et al, 1991) quienes según su conocimiento y desempeño emiten una opinión sobre cuáles deben ser los subíndices a estudiar con su respectivo valor cualitativo o cuantitativo según la importancia que a su parecer tengan los mismos (parámetros o subíndices) en el uso del agua a evaluar.

Dependiendo de lo descrito en el anterior párrafo se procede a darle un valor nominal o numérico a cada parámetro comparando y agrupando a la vez las opiniones o veredictos dados, generando así un peso según el nivel de relevancia obtenido dicho valor puede ser dado con un solo valor fijo o un rango dependiendo de la curva o diagrama de calibración. Sin embargo, en este paso se debe tener mucha precaución pues si los juicios de expertos

---

varían mucho entre si es posible por un lado que se haga una escogencia errada del vector de parámetros o por otro que el peso de ponderación no sea el adecuado, corriendo el riesgo que el índice una vez termine de ser formulado realmente no describa de manera correcta la situación o estado del agua evaluada.

Un ejemplo de esto es el *Drinking water quality index*, DWQI por sus siglas en inglés de Canadá el cual fue formulado por la *Federal Provincial Territorial Committee On Health And The Environment* de este país, que contiene un total aproximado de 106 parámetros de medición entre elementos y compuestos de diferentes características (microbiológicas, físicas y químicas) y cuyo nivel de importancia de cada uno depende de las implicaciones en la salud humana (HEALTH CANADA, 2017) o el mismo IRCA – índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano de Colombia, el cual elige 22 parámetros de un listado de compuestos o sustancias (RES. 2115 , 1998), cuya escogencia se dio en una primera instancia por las implicaciones de salud pública y en segundo lugar de las consecuencias económicas que acarrea posibles daños por presencia de estos compuestos o resultados de reacciones de los mismos que se puedan generar en el medio por condiciones que las propicien.

Continuando con la *metodología de Delphi* y una vez explicada la importancia y sensibilidad de lo que implica la escogencia de parámetros. Otro paso importante para la formulación de un índice de calidad de agua bajo este método es la forma como se ponderará los pesos asignados a cada uno de los parámetros, pues dependiendo de una fórmula de agregación se puede describir de forma correcta el estado de la calidad del agua. Estas fórmulas, aunque sencillas y parecidas a su vez pueden evaluar de diferente manera dicho estado por lo cual su escogencia depende del número de parámetros a evaluar, La cantidad de muestras a evaluar, el tiempo de estudio o análisis, el uso del agua y del número de pobladores o poblaciones aferentes al cuerpo de agua o distribución de la misma. (ver tabla 3)

Tabla 3 : Fórmulas de agregación para el cálculo de índices de calidad de agua a partir de subíndices

<i>Método</i>	<i>Fórmula</i>
1. Promedio no ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$
2. Promedio aritmético ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i w_i$
3. Promedio geométrico no ponderado	$ICA = \left( \prod_{i=1}^n q_i \right)^{1/n}$
4. Promedio geométrico ponderado	$ICA = \left( \prod_{i=1}^n q_i \right)^{w_i}$
5. Subíndice mínimo	$ICA = \min_{i=1} (q_1, q_2, \dots, q_n)$
6. Subíndice máxima	$ICA = \max_{i=1} (q_1, q_2, \dots, q_n)$
7. Promedio no ponderado modificado.	$ICA = \frac{1}{100} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \right]^2$
8. Promedio ponderado modificado.	$ICA = \frac{1}{100} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i w_i \right]^2$

Fuente : Van Helmond & Breukel, 1996<sup>2</sup>; Recuperado Fernández et al, 2005

Donde:

- ICA: Índice de calidad del agua.
- n: Número de parámetros.
- q<sub>i</sub>: Escala de calidad (Subíndice) del parámetro *i*
- w<sub>i</sub>: Factor de ponderación del parámetro *i*

<sup>2</sup> Van Helmond, C. Breukel, R. ; Physico chemical water quality indices. In: J.J. Ottens, F.A.M. Claessen, P.G. Stoks; J.G. Timmerman and R.C. Ward (Eds) – monitoring, Tailor – made II; Proceedings of an international workshop on information strategies in water management, Nunspeet, The Netherlands, 1997 , pages 475-479

Para ilustrar lo anteriormente dicho se puede usar como ejemplo una publicación del instituto CINARA adscrito a la Universidad del Valle – Colombia sobre el trabajo desarrollado por la Universidad de Pamplona Colombia, que señala como los autores del ICATEST resaltan los estudios desarrollados a finales de los 80's por investigadores como House, Coullillard y Stojda los cuales fueron encaminados al diseño de dichas fórmulas de agregación y como estas varían y se adaptan de mejor forma a las necesidades que quiere resolver cada tipo de índice. Llegando a conclusiones como que el promedio aritmético ponderado y la suma ponderada modificada entregan mejores resultados para la calidad general del agua cuando es evaluada una muestra única de agua mientras que el promedio geométrico ponderado se acoge más fácilmente a resultados certeros cuando se tiene un número grande de muestras o la media armónica al cuadrado cuando se tiene el caso contrario. un número pequeño de muestras con valores bajos de evaluación (FERNÁNDEZ et al, 2003).

### **3.2 Índice De Riesgo De Calidad De Agua Para Consumo Humano - IRCA**

En Colombia el índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano IRCA fue formulado como un índice de cálculo promedio no ponderado, expresado en forma porcentual, el cual la selección de los parámetros fue mediante *metodología de Delphi* siendo un ejemplo perfecto de lo anteriormente descrito. Sin embargo, antes de que el índice fuera diseñado, el gobierno colombiano por medio de lo que en su momento se llamó Ministerio de salud pública y haciendo uso de sus facultades mediante el artículo 7. del decreto 475 de 1998 ya había establecido los parámetros de calidad según los efectos potencialmente adversos a la salud humana o a la calidad mínima que debe tener el agua de consumo humano, clasificando dichas sustancias en 4 clases diferentes según nivel de riesgo o implicaciones y sirviendo como base para lo que en 2007 se convertiría en el IRCA.

Tabla 4 : Criterios de riesgo para parámetros de agua potable en Colombia en 1998.

<b><i>Criterios de Selección o Clases</i></b>	<b><i>Parámetros del IRCA que clasifican en cada grupo.</i></b>
Organolépticos y físicos de a calidad de agua potable.	Color verdadero, Turbiedad, Olor, Sabor, Sólidos totales, Conductividad y Sustancias flotantes.
Elementos o compuestos químicos, diferentes a plaguicidas y otras sustancias, que al sobrepasar los valores establecidos tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.	Aluminio, Molibdeno, Nitritos, Nitratos, Antimonio, Arsénico, Bario, Boro, Cadmio, Cianuro libre y disociable, Cianuro total, Cloroformo, Cobre, Cromo hexavalente, Fenoles totales, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio, Sustancias activas al azul de metileno, Grasas, Aceites y Trihalometanos totales.
Elementos de calidad química con implicaciones de tipo económico o acción indirecta sobre la salud.	Calcio, Alcalinidad total, Cloruros, Dureza total, Hierro, Magnesio, Manganeso, Sulfatos, Zinc, Fosfatos, Acidez, Hidróxidos y Fluoruros.
Microorganismos con implicación directa en la salud humana.	Coliformes totales, Escherichia coli.

Elaboración: Propia, Fuente: artículo 7. del decreto 475 de 1998.

Comparando los elementos de la tabla 4 con los parámetros del IRCA, si bien muchos de los parámetros pasaron a un segundo plano hubo otros que fueron incluidos por el panel de expertos que formuló el índice, como lo fueron el pH, el cloro residual libre, carbono orgánico total y color aparente; pero este no fue el único cambio en casi una década después de emitido el decreto 475 pues además se implementó una mejor fórmula de cálculo del índice, pasando de ser un simple porcentaje de medidas o parámetros cumplidos o incumplidos a convertirse en un promedio no ponderado representado en porcentaje como se explicó en párrafos anteriores y el cual dependiendo del valor obtenido se le asigna una evaluación cualitativa del nivel de riesgo para consumo.

A continuación, se ilustra las formulas mediante las cuales se calcula el IRCA en la actualidad (Resolución 2115 de 2007 recuperado de MACÍAS, 2014):

**% de IRCA por muestra:**

$$\%IRCA = \left( \frac{\sum \text{puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \right) \times 100$$

Ecuación 1 Cálculo de IRCA por muestra

**% de IRCA mensual:**

$$\%IRCA = \left( \frac{\sum \text{de los IRCAs obtenidos en cada muestra realizada en el mes}}{\sum \text{Total de número de muestras tomadas en el mes}} \right)$$

Ecuación 2 Cálculo de IRCA mensual

Tabla 5 : Clasificación de nivel de riesgo en Salud IRCA. Art. 15 Resolución 2115 de 2007

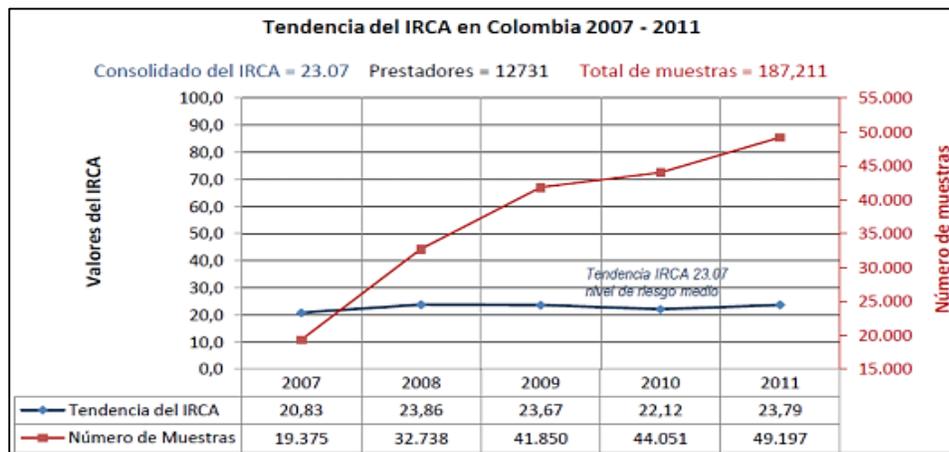
<b>Calificación IRCA</b>	<b>Nivel De Riesgo</b>	<b>Condición del Agua</b>
Entre 80,1% - 100%	Inviabile Sanitariamente	Agua no apta para el consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia del prestador, alcaldes, gobernantes y entidades del orden nacional.
Entre 35,1% - 80%	Alto	Agua no apta para el consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia del prestador, alcaldes gobernantes y entidades del orden nacional.
Entre 14,1% - 35%	Medio	Agua no apta para el consumo humano, gestión directa de acuerdo a su competencia del prestador.
Entre 5,1% - 14%	Bajo	Agua no apta para el consumo humano, susceptible de mejoramiento.
Entre 0% - 5%	Sin Riesgo	Agua apta para el consumo Humano.

Elaboración: Propia, Fuente: Art. 15 Resolución 2115 de 2007

En concordancia con lo anterior y continuando el análisis del índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano en Colombia o IRCA, en la resolución 2115 de 2007 no sólo se formula este índice como herramienta de monitoreo y evaluación sino también otros

como indicadores e índices como lo son el IRABAm o índice de riesgo municipal por abastecimiento de agua para consumo humano o el IRCA básico, el cual sólo contempla 6 parámetros de evaluación (pH, Cloro residual libre, E. coli, Coliformes totales, Color y Turbiedad) y como su nombre lo indica son los mínimos o básicos que se deben cumplir para la distribución de agua a la población. El Ministerio De Salud Y Protección Social mediante el instituto nacional de salud INS de Colombia, es el ente encargado de emitir los informes de verificación de cumplimiento del IRCA mediante la publicación del estado anual de vigilancia, pero dado al extenso número de municipios del país, sus reportes en la mayoría de los casos se limitan a describir el estado de calidad mediante la evaluación del IRCA básico. Teniendo presente la anterior información se puede observar en la figura 1 la tendencia del IRCA en Colombia para un primer periodo de 4 años y medio aproximadamente y donde se evidencia que el promedio nacional de estado del riesgo de consumo es medio según la clasificación dada en la tabla 5.

Figura 1 Tendencia del IRCA en Colombia para el periodo comprendido entre los años 2007 - 2011



Fuente: Instituto Nacional de Salud, 2011 Recuperado (VARGAS et al, 2013)<sup>3</sup>

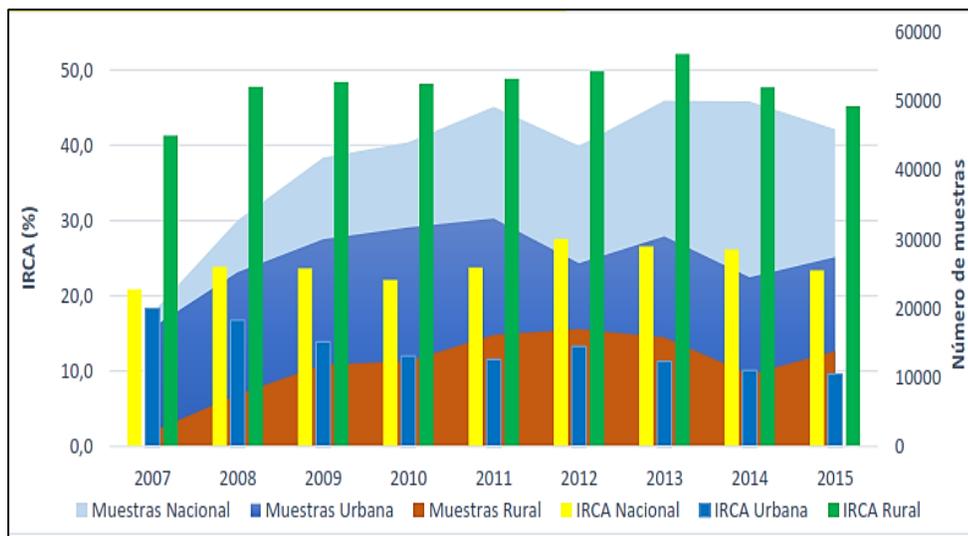
Sin embargo 8 años después de formulado el índice (para el año del 2015) los datos, aunque no son alarmantes para la evaluación a nivel nacional si lo son cuando el estudio se discrimina a nivel regional o departamental teniendo así como resultados que el 16.7 %

<sup>3</sup> Vargas, A & Molina J; Informe nacional de Calidad de agua para consumo humano, julio de 2007 – diciembre de 2011; Ministerio de Salud y Protección social, Bogotá DC, 2013.

de los departamentos de Colombia representados en un número total de 5 (Caldas, Huila, Nariño, Tolima y Putumayo) obtuvieron una calificación de riesgo alto y un 46.7% constituido en un total de 14 departamentos indican tener un riesgo medio (GUZMÁN, 2016), sumando los dos porcentajes se puede analizar que para un total del 63.4 % de los departamentos de Colombia se tiene un nivel de riesgo considerable en el agua de consumo humano.

El panorama es aún más preocupante si se discretiza el consolidado nacional del año 2015 en zona rural y zona urbana; puesto que la primera desde el año 2007 ha estado fluctuando entre el 40% y 50% encontrándose siempre en un riesgo alto. Sin embargo, del 2013 hacia hoy, el IRCA rural ha mostrado una tendencia de mejora disminuyendo el nivel de riesgo, pero aun no es suficiente para disminuir la calificación a un riesgo medio pues no se debe olvidar que dicha valoración (riesgo medio) está en el rango de 14% al 35%, en la figura 2 se puede observar lo anteriormente afirmado.

Figura 2 Tendencia del IRCA en Colombia consolidado 2007-2015.



Fuente: Instituto Nacional de Salud, 2015 Recuperado (VARGAS et al, 2013)

En general el agua de consumo humano del área rural cuenta con una calidad inferior que, al agua del mismo tipo de la zona urbana, pues mientras el casi 79% de las muestras tomadas en ciudades cuentan con una calificación de agua sin riesgo, para el campo (rural) esta calificación o estado solo alcanza el 25,7 % (GUZMÁN, 2016).

Sin embargo, estos datos publicados por el ministerio de salud y protección social cuentan con un sesgo y es el hecho que la evaluación no sea realiza sobre el total de los 100 puntos formulados en el IRCA sino sobre 77.5 puntos correspondientes a los parámetros del IRCA básico, como se mencionó en párrafos anteriores teniendo 22.5 puntos sin evaluar y los cuales al ser más de una quinta parte del total del índice puede alterar la sensibilidad de la evaluación significando así que si dentro de los 6 parámetros que únicamente se evaluaron se encuentran los de mayor cumplimiento de la normativa entonces la calificación será mejor o caso contrario si están los de mayor incumplimiento pues la calificación entregada o hecha pues entonces esta última tendrá un factor de seguridad el cual tampoco reflejaría la realidad del estado actual del agua de consumo en Colombia.

Las publicaciones de los estados de vigilancia están obligadas a informar los porcentajes de cumplimiento de estos 6 parámetros (pH, Turbiedad, Cloro residual libre, Coliformes totales, Color y *E. coli*), encontrando así que a nivel nacional, las características microbiológicas cumplieron con los estándares exigidos en un 76.2 % de las muestras para *E. coli* y el 67.1 % para Coliformes totales; esto indicó que las muestras presentaron contaminación fecal por *E. coli* el 23.8 % y por Coliformes totales el 32.9 %. Para las características fisicoquímicos se esbleció que el 94.7 % de las muestras cumplieron con el rango permitido de pH, siendo el parámetro fisicoquímico con mejor puntaje de los 4 evaluados dentro del IRCA básico, al pH en lo que corresponde a puntajes de cumplimiento lo sigue Color con 83.0%, Turbidez con 84.6 y CRL con tan solo 70.8% (SIVICAP, 2016 recuperado de GUZMÁN, 2016)

### 3.3 Bioensayos

La ciencia que estudia los efectos de los tóxicos sobre los seres vivos, así como los mecanismos de acción de dichas alteraciones, y los medios para contrarrestarlos se conoce como Toxicología. (Hernández, 2011). Al igual que muchas otras ciencias, la toxicología se divide en diferentes ramas entre ellas la toxicología ambiental y la ecotoxicología; la primera se encarga de estudiar y cuantificar el impacto que los contaminantes químicos sobre el medio ambiente; y la segunda evalúa específicamente el impacto o daños causados por los tóxicos sobre la dinámica de poblaciones en un ecosistema determinado. Ésta última también abarca el estudio de la toxicidad con diferentes grados de exposición, así como el nivel en el cual se produce el daño, desde enzimas y estructuras subcelulares, hasta organismos completos, poblaciones o comunidades. (Aguado, 2009).

Desde una definición más específica se señala ecotoxicología la rama de la toxicología encargada de estudiar los efectos como ya con anterioridad se había dicho de contaminantes sobre ecosistemas u organismos pertenecientes al mismo como del destino o deposición que dichos agentes tóxicos tienen con el fin de explicar las causas de dicha toxicidad y prever riesgos probables; es así como se denomina ecotoxicidad al resultado de todos los estrés tóxicos que actúan sobre el ambiente y es esta la razón principal de porque la respuesta de los organismos puede ser vista como una evaluación de calidad ambiental (PUIJ, recuperado 2017).

Dicho estrés toxicológico puede reflejarse en diferentes efectos dependiendo de cómo actúen las diferentes sustancias que generen la contaminación o agentes tóxicos clasificándose de la siguiente forma (VERMEIRE et al, 1992):

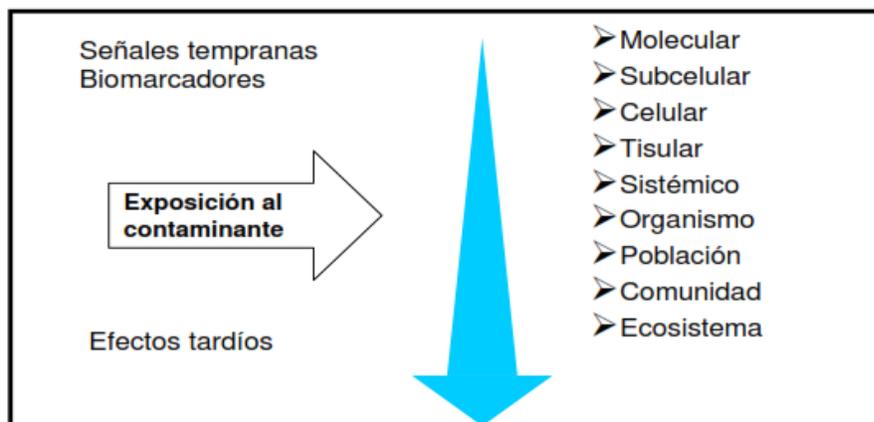
- Efecto cuantitativo: consistente en la presencia o ausencia de una característica (p. ej. muerte o existencia de tumores).
- Efecto letal: la muerte por acción directa como consecuencia de la exposición a una determinada concentración de un agente tóxico.
- Efecto subletal: se produce por debajo del nivel que causa la muerte como resultado directo de la exposición a una determinada concentración de un agente tóxico.

- Efecto agudo: aquel causado por acción de sustancias químicas sobre organismos vivos, que se manifiesta rápida y severamente (después de un corto período de exposición: 0 - 96 h, típicamente.).
- Efecto crónico: aquel que se produce, en general, después de un prolongado período de exposición (normalmente se manifiesta después de días o años, según la especie).
- Efecto aditivo: la magnitud del efecto o respuesta simultánea de dos o más sustancias es igual a la suma de los efectos o respuestas de cada una.
- Efecto combinado: cuando dos o más sustancias aplicadas al mismo tiempo producen distintos efectos o tienen diferentes modos de acción.
- Efecto de potenciación o sinergismo: cuando la toxicidad de una mezcla de agentes químicos es mayor a la esperada por la simple suma de las toxicidades de los agentes individuales presentes en la mezcla.
- Efecto de inhibición o antagonismo: cuando la toxicidad de una mezcla de agentes químicos es menor a la esperada por la simple suma de las toxicidades de los agentes individuales presentes en la mezcla.

Estos efectos pueden ser cuantificados mediante la aplicación de los bioensayos; puesto que ellos son una técnica o instrumentos metodológicos que indican cambios provocados por diferentes estresores ambientales a cualquier nivel de organización biológica, pasando desde el nivel celular (hasta subcelular) hasta un ecosistema (COLGAN et al, 2003) que al integrarse con datos de contaminante biodisponibles pueden brindar información de más sobre potenciales efectos dañinos que no son detectados a nivel de residuos químicos o biológicos. (BIERKENS et al, 1998).

La respuesta obtenida o efectos inducidos por sustancias externas ya explicados en párrafos anteriores se conoce como biomarcador, este es clasificado dependiendo de la escala a la cual se observa los cambios en ese orden de ideas se pueden señalar dos tipos de biomarcadores (PIOLA, 2011) el primero de ellos el biomarcador celular o subcelular y el segundo biomarcador a la escala de actividad biológica y comportamiento.

Figura 3 Esquema secuencial de respuestas a diferentes escalas de exposición a un polutante.



Fuente: (VAN DE OOST, 2003, recuperado PIOLA, 2011)

Sin embargo, los resultados de los bioensayos dependen de los organismos usados en el ensayo y las condiciones determinadas en el procedimiento de prueba. Así es que un efecto nocivo evaluado por medio de bioensayos estandarizados puede realmente indicar niveles de peligrosidad trasladables y asimilables a organismos que forman parte de los sistemas naturales y la biocenosis.

No obstante, nunca se debe olvidar que no existe ningún organismo ni biocenosis que pueda ser usado para evaluar todos los efectos posibles sobre el ecosistema bajo las diversas condiciones abióticas y bióticas presentes. En la práctica, solamente unas pocas especies (especies modelo), que representen funciones ecológicas relevantes, pueden ser ensayadas. Además de estas limitaciones fundamentales y prácticas en la selección de organismos de ensayo, la muestra a ser ensayada puede también plantear problemas experimentales para la realización de la prueba por lo cual es necesario evaluar con varios organismos dentro de la cadena trófica, esto es denominado batería de bioensayos. (DIAZ et al, 2004).

Existe una batería de bioensayos básica de dos ensayos biológicos en organismos tanto de origen vegetal como animal que son usados en la normativa colombiana de vertimientos de aguas residuales, ambos marcan cambios de efectos agudos; el primero de ellos indica cambios en la tasa de reproducción o diferencias en la densidad poblacional mediante un

ensayo de inhibición de crecimiento en una especie de microalga y el segundo establece mortalidad de organismos (Crustáceos) expuestos a la muestra de agua (MACÍAS, 2014). Ahora cabe aclarar que la ecotoxicología aplicada enmarca todo lo dicho con anterioridad pues es la rama de la toxicología encargada del desarrollo de los protocolos de los ensayos utilizados como herramientas de predicción tempranas que permiten establecer umbrales permisibles que sirvan a entidades reguladoras de la calidad de medios como lo son la tierra, el agua y el aire (DAY et al, 1988).

En concordancia con lo anterior y con el fin de asentar las bases teóricas de los bioensayos usados en la evaluación de agua potable como se ilustrará más adelante; se explican los dos ensayos y las condiciones especiales de cada uno para su evaluación y/o validación teniendo en cuenta los protocolos de cada práctica, en el caso de la evaluación de toxicidad aguda mediante el análisis de mortalidad de *Daphnia magna* el método C2 y para toxicidad crónica el ensayo de inhibición de crecimiento de *Selenastrum capricornutum* el método C3 ambos reglamentados por la OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development por sus siglas en inglés) como se explicará en el procedimiento (siguiente capítulo).

### **3.3.1 Ensayo de toxicidad aguda por *Daphnia magna* con tiempo de exposición de 48 horas**

El propósito de esta prueba es determinar la concentración mediana efectiva para la inmovilización de una sustancia (EC50) a *Daphnia magna*, con la cual se expresará la toxicidad aguda. Esta es la concentración, en términos de valores iniciales (número de organismos expuestos en un tiempo cero  $t_0$ , llamado también lote de ensayo), que inmoviliza el 50% de la *Daphnia* dentro de un período continuo de exposición que debe indicarse.

Cabe resaltar que el juicio de inmovilización se da si los animales u organismos expuestos no son capaces de nadar dentro del medio (muestra a evaluar) dentro de los quince (15) segundos siguientes a la perturbación o agitación suave del recipiente que los contiene. Sin embargo, no basta sólo las lecturas para validar el ensayo, es necesario contar con

controles y cartas de sensibilidad para interpretar de forma correcta sin obtener falsos positivos en los resultados.

Los controles básicamente indican la respuesta de los animales u organismos de prueba a un contaminante o sustancia toxica conocida o a un medio que simula su entorno natural hablando así tanto de controles positivos como de controles negativos, las cartas de sensibilidad por otro lado ayudan a analizar cuál es la concentración correcta del toxico conocido para obtener el (EC50). De esta forma se puede tener un mejor panorama para el tratamiento de datos para tomar decisiones de si es necesario o no validar el ensayo de la muestra de estudio con una nueva prueba.

En el desarrollo de la prueba se deben realizar los siguientes controles:

Control Positivo: el control positivo siempre deberá trabajarse con la concentración del ensayo de sensibilidad que asegure la inmovilización del 50% de la población también conocido como EC50.

Control Negativo: El control negativo no debe sobrepasar del 10% de su población total con inmovilización.

Tanto en el control positivo como en el negativo ningún organismo de prueba (neonatos de menos de 24 horas de nacidos) debe estar flotando sobre el lente de agua de los recipientes que los contengan.

### **Organismos de prueba:**

Dentro del grupo de cladóceros, las especies del género *Daphnia* de la clase crustácea, tales como *Daphnia magna*, *Daphnia pulex* y *Daphnia similis*, son utilizadas extensivamente en pruebas de toxicidad son las más utilizadas como organismos de prueba o de referencia en pruebas de toxicidad dado a su amplia distribución geográfica, la función que cumplen en la comunidad zooplanctónica, la facilidad de cultivo en el laboratorio puesto que existe mucha información sobre las técnicas de cultivo y las condiciones de entorno como temperatura, luz y nutrientes, además la reproducción partenogenética (lo cual asegura una uniformidad de respuesta) y el corto ciclo de vida con

la producción de un alto número de crías, han hecho de este grupo un ideal para la evaluación de toxicidad, de carácter universal (DÍAZ et al, 2004).

Figura 4 *Daphnia magna*.



Fuente: PLoS Genetics<sup>4</sup>

Para este caso específico, los ensayos de toxicidad con *Daphnia magna* son muy usados con muestras de diferentes tipos de aguas como lo son las residuales (sean de origen industrial o doméstico), subterráneas, superficiales o crudas y potables ya que indican con facilidad la letalidad potencial de sustancias químicas puras o efectos sinérgicos de la combinación de varias de ellas.

---

<sup>4</sup> <https://goo.gl/vVBiPh>

### 3.3.2 Ensayo de inhibición por *Selenastrum capricornutum* con tiempo de exposición de 72 horas

Básicamente el ensayo consiste en la evaluación del crecimiento exponencial de un número inicial de algas expuesto a la muestra referente al crecimiento exponencial con igual número inicial de algas de dos controles uno positivo que contiene una concentración de un tóxico de referencia ( $\text{Cr}^{6+}$ ) en el cual la tasa de crecimiento se inhibe en un 50% y otro negativo el cual sólo contiene un medio que cuenta con micronutrientes que asegura las condiciones para un crecimiento poblacional óptimo de los organismos de prueba; todo esto en un periodo de incubación de 72 horas, con lecturas de la densidad celular cada 24 horas mediante el uso de un microscopio y una cámara de Neubauer también conocido como hemocitómetro.

Luego mediante un análisis estadístico básico que incluye mediciones como desviación estándar, promedio, coeficiente de variación, cálculo de Biomasa y tasa de crecimiento, se evalúa si realmente hay ocurrencia de una inhibición de crecimiento; para asegurar esto es necesario según los protocolos de los ensayos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD), que cada muestra cuente por lo mínimo con 3 réplicas al igual que los controles debido a que la alta sensibilidad del ensayo ante cualquier perturbación o cambio en las condiciones (luz, temperatura, pH, oxígeno) por más ligero que sea puede generar una alteración en la tasa de crecimiento (densidad poblacional) de la microalga o simplemente para descartar errores de práctica o conteo.

Control Positivo: Dado a la alta sensibilidad de las microalgas, es necesario montar junto con las muestras controles positivos (medio de cultivo expuesto a un contaminante de referencia en este caso Cromo hexavalente)

Control Negativo: Los controles negativos los cuales se componente de inóculos montados en un medio ideal para el crecimiento de las *Selenastrum Capricornutum*, estos dos controles ayudarán a evaluar en que tasa pudo presentarse una inhibición de crecimiento respecto al comportamiento normal de la siembra montada.

Cabe resaltar que al igual que el montaje de toxicidad aguda montado con *Daphnia magna* este bioensayo debe asegurar que el control positivo cuente con la concentración de toxico de referencia que asegure la inhibición del crecimiento poblacional de la microalga en un 50% respecto al control negativo ( $\text{CL}_{50}$ ).

## Organismos de prueba

*Selenastrum capricornutum* es un alga verde (clorofita) unicelular con forma de media luna o aspecto de frijol (ver figura 6) cuenta con un tamaño aproximado de entre 40 y 60  $\mu\text{m}^3$ , que puede encontrarse en sistemas acuáticos epicontinentales eutróficos u oligotróficos (DIAZ et al, 2004). Este tipo de alga es usada con bastante frecuencia en ensayos de evaluación de efectos toxicológicos dado a su alta sensibilidad ante componentes con efectos tóxicos, su alta disponibilidad, estabilidad genética, uniformidad en las poblaciones (aun cuando cada cultivo/inoculo tiene su tasa de crecimiento característico su comportamiento es similar) además de tener un cultivo relativamente sencillo de realizar teniendo así una representación de su nivel en la cadena trófica. (BOHÓRQUEZ-ECHEVERRY & CAMPOS-PINILLA, 2007)

Figura 5 *Selenastrum capricornutum* vista al microscopio.



Fuente: (HUARACHI, 2014)<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Huarachi O; Colección de biotecnología de Microalgas, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú 2014 //goo.gl/1gPDec

# PROCEDIMIENTO

## 4.1 Descripción de muestras

Se analizaron 25 muestras provenientes de acueductos municipales del departamento de Cundinamarca incluyendo muestras de agua tratada del distrito capital Bogotá (Colombia).

Se analizaron muestras entre de 2015 y febrero de 2017, teniendo en promedio la recepción de 1 muestra por mes. Para utilizar las muestras de agua potable que llegaban al Laboratorio, se hizo un consentimiento informado que firmaban los dueños de las muestras, en el cual permitían el uso de los datos fisicoquímicos y las muestras para la investigación, y debido al compromiso de confidencialidad adquirido, no es posible decir explícitamente su origen.

Dado a que el estudio se centra en agua tratada cabe aclarar que todas las muestras cuentan con el tratamiento mínimo exigido según el nivel de complejidad y demanda de población descrito en el título B del reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS. De esta forma se asume que los acueductos que trataron las muestras cubren niveles de complejidad Medio alto y Alto - poblaciones superiores a los 12500 habitantes – (RAS,2000).

Tabla 6: Distribución de muestras según su nivel de complejidad de acueducto

<b>Tipo de Nivel de Complejidad</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Porcentaje sobre el total de muestras.</b>
Medio Alto	6	24%
Alto	19	76%

Según el documento del estado de vigilancia de la calidad de agua para consumo humano publicado en el año 2016, Cundinamarca se encuentra entre los 30 departamentos y distritos evaluados, teniendo un puntaje ponderado del IRCA BÁSICO para el área rural y urbana igual a 7.07 ubicando el riesgo de consumo de su agua potable en bajo. (GUZMÁN,

2016). Sin embargo, esta evaluación al ser una media no describe el estado real del nivel de riesgo de consumo que se tiene, ya que acueductos que cuenten con excelentes tratamientos “arrastran” aquellos que no cuentan con adecuadas prácticas, tampoco es claro en el número de muestras por acueducto en cada municipio pues la modelo del estudio del instituto nacional de salud (INS) está en función a los análisis totales de calidad de agua potable municipales que a su vez no cuentan con uniformidad en los procesos de monitoreo y control; lo cual no asegura que cada municipio haya tomado y analizado igual número de muestras de agua tratada para consumo.

En concordancia con lo anterior, el estado de vigilancia del año 2015 señala un total de 2905 muestras de agua para consumo humano reportadas por el departamento de Cundinamarca para describir su estado de riesgo. Estas muestras se distribuyen en 3 categorías dependiendo la zona donde se haya realizado la toma; teniendo así un total de 2114 muestras para zonas urbanas, 743 muestras para zonas rurales y 48 muestras que no cuentan con un registro de su toma. (SIVICAP, Grupo Calidad de Agua – DRSP, Instituto Nacional de Salud), Sin embargo 31 muestras de las 2905 mencionadas no cuentan con algún proceso de tratamiento o potabilización, teniendo finalmente un total de 2874 muestras de agua tratada (GUZMÁN, 2016); que para efectos prácticos corresponde a una cifra redondeada de 25 muestras por municipio, puesto que el departamento de Cundinamarca cuenta con 116 municipios<sup>6</sup>.

Las muestras analizadas corresponden aproximadamente al 10 % de la cantidad total de muestras que se analizaron para el departamento de Cundinamarca durante 2015. Se presentan los resultados de 25, que fueron las que cumplieron con todos los criterios de calidad requeridos, del total de muestras analizadas. Este número de muestras concuerda con el número de muestras usado en estudios de toxicidad en agua de consumo realizados con anterioridad en otros países, por ejemplo, el trabajo realizado sobre el río Yangtsé para estudiar efectos y/o alteraciones endocrinas por contaminantes en agua potable se usaron un total de 23 muestras (JIANG et al, 2012).

---

<sup>6</sup> <https://www.dane.gov.co/files/censo2005/provincias/subregiones.pdf>

## 4.1 ANALISIS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Los análisis fisicoquímicos microbiológicos para evaluar la calidad se realizaron en el laboratorio de ingeniería ambiental (LIA) de la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá, donde se midieron los parámetros listados en la Tabla 7 la cual incluye los métodos de análisis (APHA, 2012).

Tabla 7: Tabla de ensayos realizados según protocolo APHA.

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
Turbiedad	SM 2130
Color Verdadero	SM 2120
pH	SM 4500-H <sup>+</sup>
Alcalinidad total	SM 2320
Dureza total	SM 2340
Calcio	SM 3500-Ca
Magnesio	SM 3500-Mg
Hierro por Colorimetría	SM 3113
Manganeso por Colorimetría	SM 3113
Nitritos	SM 4500-NO <sub>2</sub>
Nitratos por Colorimetría	SM 4500-NO <sub>3</sub>
Cloruros	SM 4500-Cl <sup>-</sup>
Sulfatos	SM 3111
Fosfatos	SM 3111
Aluminio	SM 3111
Cloro Residual libre	SM 4500-Cl
Coliformes Totales	SM 9222
E. coli	SM 9222

## 4.2 BIOENSAYOS

Enmarcado como una segunda parte del desarrollo experimental se encuentra los montajes de ensayos de toxicidad aguda con *D. magna* (evaluación de mortalidad – inmovilización total) y toxicidad crónica con *Selenastrum capricornutum* (evaluación de inhibición de crecimiento poblacional o biomasa).

El primero implica el cuidado de acuarios de crianza de *Daphnia magna* mientras que el segundo la realización de inóculos de cultivos de *Selenastrum capricornutum* como bases de obtención de organismos de prueba, y al tratarse de un microorganismo vegetal y otro animal, los montajes de ambos ensayos son completamente diferentes pues la respuesta de cada uno de ellos (microorganismos) varía, haciendo pues que la duración y evaluación de cada uno de ellos sea distinta, como anteriormente se explicó en el marco teórico.

Estos bioensayos se realizaron siguiendo los protocolos de los métodos de ensayo C2 y C3, correspondientes a OJ de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos OECD (2016).

### 4.2.1 Ensayo de toxicidad aguda por *Daphnia magna* con tiempo de exposición de 48 horas

Dado la sensibilidad de los cultivos de *D. magna*, estos deben mantenerse en recipientes de uno, dos o tres litros, o cualquier otro sistema que resulte funcional todo con el fin de asegurar que se conserven las condiciones óptimas para el adecuado crecimiento de los organismos, una recomendación dada por la Dra. Consuelo Díaz radica en la densidad poblacional la cual no debe sobrepasar los doce (12) individuos por litro de medio.

El medio donde se tienen los organismos (conocido como cultivo) consta en agua reconstituida con una dureza entre 160 y 180 mg CaCO<sub>3</sub>/L. Esto según las recomendaciones de medio hecho en laboratorio (APHA, 1998)<sup>7</sup> En muchas ocasiones se pueden presentar problemas de reproducción, crecimiento o alta mortalidad antes de llegar

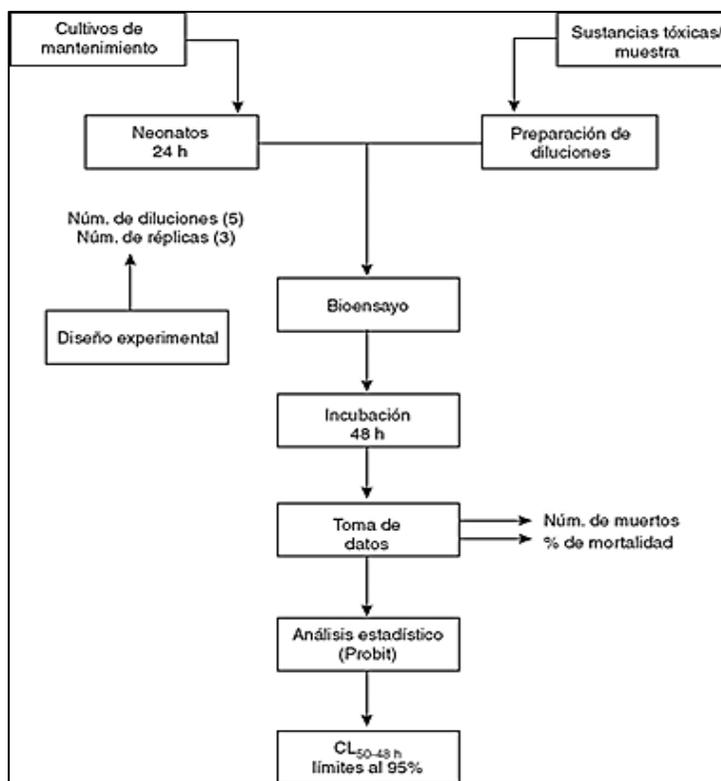
---

<sup>7</sup> APHA, 2005, Standard methods for the examination of water and wastewater, edición 21, Washington D.C.

a la etapa adulta, para lo cual se puede complementar el medio con soluciones de vitaminas y selenio. Sin embargo dichos suplementos (biotina, vitamina B12, tiamina y selenito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) sólo se deben adicionar si se cuenta con un déficit de crecimiento puesto que en caso dado de ser utilizados los mismos hay que preparar dichas soluciones a parte del agua dura que contiene los organismos (ELENDET & BIAS, 1990).

Condiciones de la muestra: Para asegurar que la mortalidad o inmovilización de los neonatos sea por la presencia de sustancias tóxicas antes de comenzar el ensayo se debe hacer medición tanto de oxígeno disuelto como de temperatura y pH pues la muestra debe estar aclimatada además de contener por lo menos una concentración de 3 mg/L de oxígeno disuelto; en caso dado que al finalizar la prueba (48 horas después) el pH haya variado más de una unidad o que el oxígeno disuelto haya disminuido más de 2 mg/L debe considerarse invalido el ensayo, además para garantizar que dicha mortalidad no se debe a la cloración del agua es necesario agregar una cantidad de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (Tiosulfato de Sodio) dependiendo de la lectura de Cloro Residual Libre CRL, con el fin de neutralizar la muestra.

Figura 6 Diagrama de flujo de la Prueba de toxicidad aguda con *Daphnia magna*.



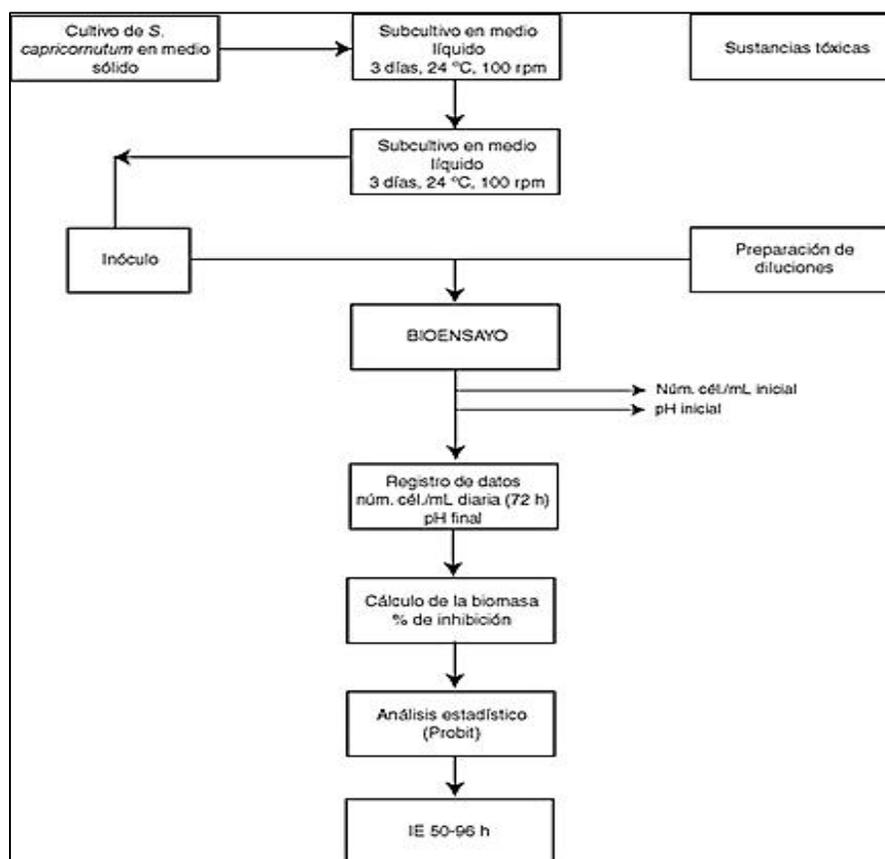
Fuente: Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas, Pag.62 (DÍAZ et al, 2004)

#### Datos y presentación de resultados

Según protocolo anteriormente explicado, los resultados deben ser mostrados o reportados con las lecturas del ensayo a las 48 horas de exposición de los neonatos de *Daphnia magna*, estos deben además contar con los valores de oxígeno disuelto, pH y temperatura de cada muestra evaluada antes y después de realizar el bioensayo esto con el fin de asegurar que durante la realización del mismo se contó con las condiciones mínimas de seguridad evitando que algún agente externo interviniera llegando a alterar los datos de mortalidad o toxicidad aguda (OECD, 2016).

#### **4.2.2 Ensayo de inhibición por *Selenastrum capricornutum* con tiempo de exposición de 72 horas**

Antes de describir cómo es el protocolo del ensayo, cabe aclarar que previo al mismo se debe contar con inóculos para sembrar las muestras y los controles para ello se mantienen las algas en tubos con medio AAP ( solución que cuenta con macro y micronutrientes) de concentración simple a unos 4°C cubiertos para evitar luz que estimule la fotosíntesis de las algas; dichos inóculos tienen un periodo útil o vigencia de 6 meses por lo cual se debe estar renovando los mismos con al menos 4 meses de diferencia para conservar las características celulares de las *S. capricornutum*, ya habiendo explicado lo anterior se procede a usar dicho inóculo para el procedimiento presentado en la figura 7 (DÍAZ et al, 2004).

Figura 7 Diagrama de flujo ensayo *S. capricornutum*

Fuente: Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas, Pag.89 (DÍAZ et al, 2004)

### Condiciones de la muestra

Para asegurar que la inhibición de crecimiento o toxicidad crónica evaluada mediante la microalga (*Selenastrum capricornutum*) sea por la presencia de sustancias tóxicas antes de comenzar el ensayo se debe hacer medición tanto de temperatura como de pH pues la muestra debe estar aclimatada o ajustada a las condiciones del ensayo antes de su realización dado a la alta sensibilidad del microorganismo usado en la prueba. Puesto que se debe asegurar que al finalizar el ensayo (72 horas después) el pH no haya variado más de una unidad ya que si esto sucede debe considerarse inválido el ensayo.

Además, al tratarse de agua potable es necesario garantizar la neutralización del cloro para certificar que la lectura de inhibición de biomasa a las 72 horas se produce por cualquier otro agente tóxico fuera del cloro usado en la potabilización de las muestras analizadas, para ello es necesario medir el cloro residual libre presente en las mismas mediante la titulación de 100 mL de cada muestra y agregar el volumen necesario de

Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tiosulfato de Sodio) para neutralizar el cloro presente en caso que las muestras cuenten aún con alguna concentración de Cl.

#### Datos y presentación de resultados

Según protocolo anteriormente explicado, los resultados deben ser mostrados o reportados con las lecturas de densidad poblacional del ensayo a las 72 horas de exposición del inóculo o siembra de algas (*Selenastrum capricornutum*) con su respectivo cálculo de Biomasa, porcentaje de inhibición de crecimiento, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación entre las réplicas de cada control (positivo y negativo) y muestra, sin olvidar además de la determinación de los valores de pH y temperatura de cada muestra evaluada antes y después de realizar el bioensayo esto con el fin de asegurar que durante la realización del mismo se contó con las condiciones mínimas de seguridad evitando que algún agente externo interviniera llegando a alterar los datos de inhibición de crecimiento o toxicidad crónica evaluada como se explicó en el aparte de las condiciones de la muestra.

### **4.3 Cálculo del IRCA**

Para el cálculo del IRCA se realizaron 2 análisis: el IRCA básico que considera solamente 6 parámetros, y es el que se utiliza en los reportes de los entes de vigilancia y control, y el IRCA sobre todos los parámetros analizados.

En las muestras analizadas, se evaluaron los 18 parámetros de la Tabla 7 y con esos resultados se calculó el IRCA con la ecuación 1, y luego se determinó el porcentaje de muestras que se encuentran en cada nivel de riesgo, según la normativa colombiana. Adicionalmente, se identificaron cuáles de los parámetros evaluados fueron los que tuvieron un mayor incumplimiento.

## 4.4 Formulación de la propuesta de modificación del IRCA

Para formular la propuesta para incluir la toxicidad en el IRCA, se siguió la metodología DELPHI. El método Delphi tiene como fin de consultar mediante una encuesta a expertos en el tema, quienes de forma anónima (sin que ellos tengan conocimiento de los demás participantes) dieran su apreciación acerca de los puntajes que se usan actualmente en los 21 parámetros del IRCA y sobre su aceptación o no de los ensayos de mortalidad de *D. magna* e Inhibición de crecimiento poblacional de *S. capricornutum* como conjunto de parámetros que indican la presencia de sustancias tóxicas en el agua para consumo.

Para realizar lo anterior, se seleccionaron 15 especialistas en calidad del agua, funcionarios de la secretaria distrital de salud, profesionales de la empresa de acueducto, profesionales independientes relacionados con el área, profesores e investigadores reconocidos en el área, a quienes se les envió vía correo electrónico una encuesta diseñada para obtener la apreciación de al menos 7 de ellos, logrando tener 9 encuestas, incluyendo una diligenciada por la autora del trabajo.

Para lograr esto último (evaluar a forma de ejercicio individual la inclusión o no de la toxicidad como una nueva clase de parámetros), fue necesario realizar un estudio del cual surgieron los parámetros que potencialmente podían tener una redistribución de puntaje de riesgo, y así poder responder la encuesta, dando un razonamiento acerca de si es posible agregar o no los dos nuevos ensayos como parámetros toxicológicos al cálculo del IRCA. Dicha respuesta como anteriormente se mencionó considera cuales son los parámetros que potencialmente pueden ser modificados teniendo en cuenta la incidencia de cada uno de ellos en la salud humana como primera instancia y las repercusiones económicas que puede generar su presencia en el agua potable, para ello se usó como guía y modelo el índice de calidad de agua para consumo de Canadá, DWQI por sus siglas en inglés (HEALTH CANADA, 2017), el cual fue formulado por la *Federal Provincial Territorial Committee on Health and the Environment* como se indicó en el marco teórico.

Con todas las encuestas diligenciadas, se realizó el análisis de las respuestas, ajustando los parámetros modificados por los expertos, mediante un análisis básico de estadística que abarca promedio de valores, modas, amplitud, etc, que generó una nueva propuesta para el cálculo del IRCA.



# RESULTADOS

## 5.1 ANALISIS FISICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

En la tabla 8 se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados a las 25 muestras analizadas. De igual forma en la Tabla 9 y la Figura 8 se presentan el porcentaje y los parámetros que no cumplieron con los valores establecidos por la norma.

Tabla 8 Resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados a las 25 muestras analizadas

Listado de muestras	Turbiedad (UNT)	color verdadero (UPC)	pH (UNO)	Alcalinidad Total (mg/L CaCO3)	Calcio (mg/L CaCO3)	Magnesio (mg/L CaCO3)	Hierro (mg/L Fe)	Manganeso (mg/L Mn +7)	Nitritos (mg/L NNO NO2NO)	Nitratos (mg/L NNO NO3NO)	Cloruros mg/L ClO	Sulfatos mg/L SO4 =	Cloro Residual Libre mg/L Cl2	Aluminio (mg/L Al <sup>3+</sup> )	Dureza Total (mg/L CaCO3)	Coliformes Totales (UFC/100 ml)	E. coli (UFC/100 ml)	Fosfatos (mg/L-PO4 -3)
M01	1.81	3.00	7.44	8.00	136.00	8.00	0.10	0.05	0.10	0.10	23.40	105.80	1.15	0.022	144.00	1,6 X 10 <sup>2</sup>	0.00	0.20
M02	1.05	2.00	6.52	66.00	66.00	85.00	0.10	0.05	0.10	0.20	28.90	113.20	1.70		151.00	0.00	0.00	0.20
M03	0.451	2.00	7.29	60.00	58.00	60.00	0.10	0.05	0.10	0.30	23.20	103.80	1.00	0.01	118.00	32.00	0.00	0.20
M04	0.242	2.00	6.76	11.00	12.00	4.00	0.10	0.05	0.10	0.10	3.60	4.50	1.20		16.00	0.00	0.00	0.20
M05	0.341	4.00	6.66	9.00	12.00	10.00	0.10	0.05	0.10	0.10	3.70	4.50	1.20		22.00	0.00	0.00	0.20
M06	0.301	4.00	6.88	9.00	14.00	12.00	0.10	0.05	0.10	0.10	3.70	4.60	0.70		26.00	0.00	0.00	0.20
M07	0.148	4.00	7.53	63.00	166.00	26.00	0.10	0.05	0.10	0.20	28.80	136.00	0.70		192.00	2.00	0.00	0.20
M08	0.083	2.00	7.69	39.00	108.00	44.00	0.10	0.05	0.10	0.10	26.00	131.60	1.60		152.00	0.00	0.00	0.20
M09	1.04	4.00	7.69	13.00	16.00	9.00	0.10	0.05	0.10	0.50	11.20	16.90	0.00		25.00	39.00	0.00	0.20
M10	0.391	0.00	7.58	58.00	132.00	28.00	0.10	0.05	0.10	0.20	22.20	96.80	0.80		160.00	4.00	0.00	0.20
M11	0.486	0.00	7.69	61.00	142.00	22.00	0.10	0.05	0.10	0.20	24.80	99.80	0.70		164.00	12.00	0.00	0.20
M12	0.091	2.00	7.47	36.00	134.00	16.00	0.10	0.05	0.10	0.20	29.00	82.10	0.70		150.00	13.00	0.00	0.20
M13																3.00	0.00	
M14	0.691	3.00	7.66	52.00	168.00	16.00	0.10	0.05	0.10	0.10	0.10	0.60	0.85		184.00	5.00	0.00	0.20
M15	0.535	3.00	7.76	63.00	172.00	24.00	0.10	0.05	0.10	0.10	33.10	121.70	0.60		196.00	35.00	0.00	0.20
M16	0.576	1.00	7.82	85.00	164.00	44.00	0.10	0.05	0.10	0.20	36.60	115.50	1.10		208.00	128.00	0.00	0.20
M17	0.148	2.00	7.98	86.00	194.00	14.00	0.10	0.05	0.10	0.10	43.80	126.50	1.20		208.00	0.00	0.00	0.20
M18	0.412	2.00	7.02	10.00	6.00	2.00	0.10	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.00		8.00	0.00	0.00	0.20
M19	0.808	3.00	7.92	92.00	198.00	16.00	0.10	0.05	0.10	0.10	55.00	130.00	1.50	0.05	214.00	0.00	0.00	0.20
M20	0.338	1.00	7.84	98.00	188.00	36.00	0.10	0.05	0.10	0.10	67.20	134.50	1.70		224.00	0.00	0.00	0.20
M21	0.218	7.00	7.58	57.00	122.00	40.00	0.10	0.05	0.10	0.10	19.80	81.80	1.20	0	162.00	0.00	0.00	0.20
M22	0.14	7.00	7.70	48.00	130.00	13.00	0.10	0.05	0.10	0.10	22.60	82.70	1.10		143.00	0.00	0.00	0.20
M23	0.556	7.00	5.80	5.00	8.00	4.00	0.10	0.05	0.10	0.10	1.50	0.80	0.00	0.007	12.00	10.00	0.00	0.32
M24	0.859	6.00	5.91	6.00	8.00	2.00	0.10	0.05	0.10	0.10	1.40	0.70	0.00	0.007	10.00	26.00	0.00	0.30
M25	0.452	8.00	7.70	53.00	155.00	21.00	0.10	0.05	0.10	0.10	16.50	110.40	1.10		176.00	0.00	0.00	0.20

Tabla 9: Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos incluidos en el IRCA que no cumplen con la Res. 2115/2007 en Porcentaje

<b>Parámetro</b>	<b>% Muestras que Incumplen</b>
pH	8%
Calcio	33%
CRL	17%
Coliformes Totales	52%

## 5.2 IRCA

En la tabla 10 se presentan los resultados del calcular el IRCA básico, y el IRCA completo con todos los parámetros evaluados en todas las muestras de agua potable analizadas, y el nivel de riesgo establecido en la Resolución 2115/2007.

Tabla 10: Resultados del IRCA básico y completo y nivel de riesgo

<i>Muestra</i>	<i>IRCA BÁSICO</i>	<i>Evaluación Riesgo IRCA básico</i>	<i>IRCA TOTAL</i>	<i>Evaluación Riesgo IRCA total</i>
M01	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M02	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M03	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M04	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M05	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M06	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M07	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M08	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M09	39%	ALTO	33%	MEDIO
M10	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M11	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M12	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M13	38%	ALTO	38%	ALTO
M14	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M15	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M16	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M17	0%	SIN RIESGO	1%	SIN RIESGO
M18	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M19	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO

M20	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M21	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M22	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M23	41%	ALTO	34%	MEDIO
M24	41%	ALTO	34%	MEDIO
M25	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO

## 5.3 RESULTADOS BIOENSAYOS

### 5.3.1 Toxicidad aguda con *Daphnia magna*

En el bioensayo con *Daphnia magna*, la variable de es la mortalidad de los individuos a 48 horas, en la Tabla 11 se presenta el consolidado de los resultados obtenidos, con las siguientes condiciones del Bioensayo:

Organismo utilizado: *Daphnia magna*

No. De individuos: 21

No. De réplicas: 3

Variable de respuesta: Mortalidad

Duración del ensayo: 48h

Control Positivo: 0,3 mg/L Cr <sup>+6</sup>

Tabla 11: Reporte de los ensayos de toxicidad aguda con *D. magna* (48 Horas) para las 25 muestras seleccionadas.

MUESTRA	TOTAL LECTURA 48 HORAS	EVALUACIÓN
M01	0	NO ECOTOXICA
M02	0	NO ECOTOXICA
M03	2	NO ECOTOXICA
M04	0	NO ECOTOXICA
M05	1	NO ECOTOXICA
M06	1	NO ECOTOXICA
M07	2	NO ECOTOXICA
M08	0	NO ECOTOXICA
M09	0	NO ECOTOXICA
M10	0	NO ECOTOXICA
M11	0	NO ECOTOXICA
M12	0	NO ECOTOXICA
M13	0	NO ECOTOXICA
M14	3	NO ECOTOXICA
M15	9	NO ECOTOXICA

M16	3	NO ECOTOXICA
M17	12	ECOTOXICA
M18	0	NO ECOTOXICA
M19	7	NO ECOTOXICA
M20	14	ECOTOXICA
M21	0	NO ECOTOXICA
M22	0	NO ECOTOXICA
M23	2	NO ECOTOXICA
M24	21	ECOTOXICA
M25	4	NO ECOTOXICA

Nota: En el anexo B, se detalla los valores para cada montaje de los ensayos de mortalidad a las 48 horas que se realizaron y de los cuales se obtuvieron los datos de la tabla 11.

### 5.3.2 Toxicidad crónica con *S. capricornutum*

En el bioensayo con *S. capricornutum*, la variable de es el porcentaje (%) de inhibición de crecimiento de la biomasa a 72 horas, en la Tabla 12 se presenta el consolidado de los resultados obtenidos, con las siguientes condiciones del ensayo:

Organismo utilizado: *S. capricornutum*

Concentración inicial: 10000 cel/ml

Número de réplicas: 3

Variable de respuesta: % Inhibición del crecimiento de la biomasa

Duración del ensayo: 72h

Control positivo: 0.5 mg/L Cr <sup>+6</sup>

Tabla 12 : Reporte de los ensayos de toxicidad crónica con *S. Capricornutum* (72 Horas)

<b>Muestra</b>	<b>% Inhibición Biomasa</b>	<b>Toxicidad</b>
<b>M01</b>	68%	SI
<b>M02</b>	88%	SI
<b>M03</b>	64%	SI
<b>M04</b>	73%	SI
<b>M05</b>	62%	SI
<b>M06</b>	67%	SI
<b>M07</b>	52%	SI
<b>M08</b>	75%	SI
<b>M09</b>	94%	SI
<b>M10</b>	74%	SI
<b>M11</b>	51%	SI
<b>M12</b>	68%	SI

<b>Muestra</b>	<b>% Inhibición Biomasa</b>	<b>Toxicidad</b>
<b>M13</b>	82%	SI
<b>M14</b>	80%	SI
<b>M15</b>	65%	SI
<b>M16</b>	78%	SI
<b>M17</b>	68%	SI
<b>M18</b>	73%	SI
<b>M19</b>	38%	SI
<b>M20</b>	86%	SI
<b>M21</b>	82%	SI
<b>M22</b>	76%	SI
<b>M23</b>	64%	SI
<b>M24</b>	92%	SI
<b>M25</b>	83%	SI

Nota: En el anexo A, se detalla los valores para cada montaje de los ensayos de inhibición de crecimiento que se realizaron y de los cuales se obtuvieron los datos de la tabla 12.

En las tablas 13 y 14 se presenta un resumen de los resultados de toxicidad crónica y aguda respectivamente.

Tabla 13 : Resumen de los resultados para el ensayo de toxicidad crónica con *S. capricornutum* (72 Horas)

<b>Bioensayo <i>S. capricornutum</i></b>		
<b>Muestras</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Porcentaje</b>
No Ecotóxicas	0	0%
Ecotóxicas	25	100%

Tabla 14: Resumen de los resultados para el ensayo de toxicidad aguda con *D. magna* (48 Horas) para las 25 muestras seleccionadas.

<b>Bioensayo <i>D. magna</i></b>		
<b>Muestras</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Porcentaje</b>
No Ecotóxicas	17	68%
Ecotóxicas	8	32%



## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados que tuvieron algún porcentaje de incumplimiento, (Tabla 9) se tiene el caso del Calcio, el cual en un 33% de las muestras se sobrepasa los valores admisibles de la norma. Cabe aclarar que si bien esto no repercute directamente en la salud humana si tiene efectos a corto plazo de tipo económico por lo cual es necesario que cada muestra sea analizada en caso particular (cada cliente o acueducto evaluado), pues estos inciden en posibles daños de la red de distribución sin embargo aun cuando se tiene concentraciones de este elemento por encima de la permitida en el IRCA, la dureza total medida cumple en un 100% de las muestras.

En el caso de la turbiedad, todas las muestras cumplieron con este parámetro, lo que hace denotar que los procesos físicos de filtración son eficientes para las Plantas origen de las muestras.

Los Coliformes totales y *E. coli* son los dos únicos parámetros microbiológicos dentro del IRCA, su evaluación y puntaje son los más significativos del índice con un total de 40 puntos entre ambos parámetros, pues la presencia de estos en el agua de consumo tiene serias implicaciones en la salud ya que son indicadores de la presencia de bacterias patógenas que pueden generar enfermedades gastrointestinales.

En la tabla 9 se observa que el 52% de las muestras analizadas dieron presencia de Coliformes totales. Generalmente los casos de agua potable contaminada que se encuentran o registran se dan en valoraciones hechas en los puntos de entrega (hogares), pues las redes de suministro y tanques de almacenamiento están altamente expuestos a la presencia de microorganismos los cuales son capaces de sobrevivir por su habilidad de formar biopelículas. Por esto es tan importante el proceso de desinfección como en párrafos anteriores se mencionó. Ahora, retomando el estudio del Instituto Nacional de salud de 2012 donde se inspeccionó el estado de la calidad de agua potable domiciliaria en Bogotá y Soacha para las muestras tomadas en 26 casas en diferentes épocas del año, se encontró que en un 55.8% de ellas tenían o contaban con presencia de coliformes totales mientras que un 37% marcó positivo para la prueba de *E. coli* (SILVA, 2012), lo cual también está ocurriendo en este estudio.

En concordancia con lo anterior, los porcentajes de incumpliendo son altos, aun cuando ninguna de las muestras presentó unidades formadoras de colonia para *Escherichia coli*, un 52% de muestras marcaron ser positivas por presencia de coliformes totales. Teniendo en cuenta que la resolución 2115 de 2007 es muy clara al decir que para considerar una muestra apta el reporte de ambos ensayos por filtración de membrana debe ser igual a cero (0) unidades formadoras de colonias, la calidad del agua evaluada cuenta con un déficit importante, pues el estudio realizado hace 5 años<sup>8</sup> indica que la tendencia ha sido constante.

En cuanto al cloro residual libre, que es la cantidad de cloro que queda o sobra tras realizar el proceso de desinfección en la planta de potabilización de agua, su presencia es importante dado que ayuda a limpiar de agentes nocivos, destruyendo la estructura celular de organismos bacterianos que puedan presentar o estar a lo largo de la red de distribución del agua para consumo humano, asegurando de esta forma que el agua se conserve potable (OMS, 2004)<sup>9</sup>. En la tabla 9 se observa que el 17% de las muestras incumplen con el valor de la norma, por ausencia de CRL (ver tabla 8).

Aunque la no presencia de cloro residual libre en el agua no implica que existan microorganismos si indica que el agua puede ser potencialmente contaminada, sin embargo, también es delicado una alta concentración de cloro en el agua como anteriormente se mencionó. Los ácidos Haloacéticos, AHAs, y los trihalometanos, THMs, son conocidos subproductos de los procesos de desinfección para la potabilización del agua; su formación se da por la reacción de la materia orgánica disuelta en el agua (cruda o tratada) con el cloro utilizado en la purificación o limpieza del agua; según estudios cerca del 90% de estos subproductos se forman dentro de las primeras 5 horas de contacto del cloro con el agua sometida a tratamiento (CAMPO, 2003), por lo cual un exceso de CRL (Cloro residual libre) como el obtenido en los análisis de las muestras podría indicar potencialmente la formación de AHAs y THMs. Sin embargo, no pasa más allá de ser una hipótesis pues las muestras no cuentan con lecturas o análisis de COT (carbono orgánico

---

<sup>8</sup> Inspección preliminar de algunas características de Toxicidad en el agua potable domiciliaria, Bogotá y Soacha, Grupo de salud ambiental, INS (SILVA, 2012)

<sup>9</sup> OMS, Organización mundial de la salud, guidelines for drinking water quality, Edición 3, Ginebra, Suiza, 2004.

total) para identificar la presencia o contenido de materia orgánica que ayudara a la formación de los compuestos mencionados (AHAs y THMs).

De acuerdo con la agencia de protección del medio ambiente de Estados Unidos USEPA por sus siglas en inglés, estos subproductos del proceso de desinfección con Cloro tienen implicaciones en la salud que van desde irritabilidad en los ojos hasta cáncer dependiendo si el tiempo de exposición a esas sustancias es prolongada, según reportes de la agencia internacional para la investigación sobre el cáncer (IARC, 2004), por lo cual se debe priorizar el análisis de la aparición de estos, tal y como lo recomiendan estudios de la Universidad de los Andes, en los cuales se evidenciaron contenidos de ácidos monocloroacéticos y tricloroacéticos (CAMPO, 2003), los cuales no solo son subproductos del proceso de desinfección de las plantas de potabilización sino también se producen en la industria para ser usados como antisépticos o herbicidas en cultivos como es el caso de los TCAA ( $C_2H_3ClO_2$ ).

Cabe aclarar que la universidad de los Andes realizó el estudio de presencia de ácidos haloacéticos en agua potable en la ciudad de Bogotá, inspecciones preliminares de características de toxicidad en agua de consumo hecho por el INS en el 2012 en la misma ciudad indican que, en puntos de entrega como tanques de almacenamiento y grifos de domicilios, la concentración de Cloro residual libre es baja, por lo cual no se debe descartar la presencia de AHAs en la red de distribución del acueducto; esto último concuerda con los datos para el análisis de las 25 muestras realizado en el LIA, donde se obtuvo 0.96 mg/L de  $Cl_2$  como valor medio de las mediciones, siendo este un dato bajo pero que se encuentra en el rango permisible de la norma, aún con esto se obtuvo que un 17% de las muestras incumplieron los valores teniendo lecturas de 0 mg/L de  $Cl_2$ .

Esto coincide con otros estudios nacionales de agua que cuenta con procesos de potabilización o desinfección para consumo como el realizado en el departamento de Córdoba en las poblaciones de Chinúy y Corozal donde el tratamiento para potabilizar el agua extraída del acuífero de Morroa es mediante el uso de cloro gaseoso; el estudio arrojó que en promedio se tiene concentraciones de cloro residual de  $1.1 \frac{mg}{L}$  pero que dicho valor cambia dependiendo si es o no temporada de lluvias pues las concentraciones de THMs en su componente Cloroformo CHCl fueron más altas para épocas “invernales” generando un riesgo para la salud respecto a la probabilidad de contraer cáncer por exposición a este tipo de compuestos. (MARRUGO et al, 2016)

Pero el Cloro no es el único elemento que genera subproductos del proceso de potabilización de agua, sales usadas en procesos físicos de precipitación también pueden generar compuestos al interactuar con otras sustancias que al no ser estudiadas pueden convertirse en potenciales contaminantes emergentes al no conocer si causan o no efectos nocivos en ecosistemas o en la salud humana, un ejemplo de sales formadoras de compuestos formados pos potabilización son las usadas en la fase de coagulación como lo es el Sulfato de Aluminio, que ayuda a precipitar partículas pero al no tener un proceso adecuado de remoción puede reaccionar generando compuestos como los silicatos de aluminio que se han encontrado como trazas de contaminación en puntos de entrega de agua potable, para un total de 94% de las viviendas que hicieron parte del estudio. (SILVA et al, 2012).

El silicato de aluminio es un conocido tóxico causante de inhibición de crecimiento en fitoplacton o algas verdes como la *Chlorella vulgaris* en medios acuáticos (SÁNCHEZ et al, 2002) lo cual puede explicar o ser una potencial razón de la diferencia tan marcada en los resultados de los análisis de toxicidad realizados a las 25 muestras de agua potable de diferentes acueductos de la sabana, pues es muy notorio el mayor grado de sensibilidad en el ensayo de origen vegetal (*Selenastrum capricornutum*), que es 3 veces la sensibilidad de los ensayos de origen animal (*Daphnia magna*), tal y como se ilustra en las tablas 14 y 15 del capítulo de resultados, sin embargo Sanchez en el 2002 también ensayan con crustáceos planctónicos del orden *Cladocera*, pero no ensayos de toxicidad aguda sino crónica, exponiendo la *Daphnia magna* a periodos largos a medios con diferentes concentraciones de silicato de aluminio, encontrando que el compuesto genera alteraciones de tipo reproductivo en las pulgas . Al llevar estos resultados a una escala mayor no se debe olvidar que el aluminio es conocido por sus nocivos en la salud humana más específicamente por sus alcances neurotóxicos y su relación con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer (OMS, 2014).

Ahora cabe anotar que de las 25 muestras analizadas sólo a 5 de ellas se le realizó el ensayo de detección de aluminio por espectrofotómetro, encontrando en 4 de las 5 muestras trazas de aluminio, sin embargo, el 100% de estas 5 muestras, cumplió para la concentración admisible de aluminio indicado en la resolución 2115 de 2007 donde se formula el IRCA.

Al revisar los resultados de los ensayos de toxicidad (Tablas 14 y 15) se obtuvo que todas las muestras analizadas presentaron toxicidad en la evaluación con *S. capricornutum*, y el 32% dieron toxicidad con *D. magna*. Esta diferencia en la respuesta obtenida con los dos organismos de prueba, se debe a que la *D. magna* es más sensible a la presencia de metales pesados, mientras que las microalgas son más sensibles a compuestos químicos orgánicos, y los dos resultados se complementan.

Sería necesario estudiar más a fondo la sensibilidad de las microalgas *Selenastrum capricornutum* ante el Aluminio pues no se puede dar por hecho que sea este el causante de los resultados alarmantes del ensayo ecotoxicológico, (recordando que se tiene un 100% de muestras positivas para inhibición de crecimiento de biomasa), lo que sí es claro es el hecho que el resultado indica un factor contaminante recurrente en las muestras y que al estar estas en un rango de riesgo medio para consumo humano, quizás el agente que cause dicha toxicidad no está siendo evaluado dentro de los parámetros del IRCA o su concentración admisible está siendo subestimada o sobrevaluada, encontrando que a menores concentraciones se puede obtener ensayos toxicológicos positivos como lo es el caso del aluminio. Sirviendo la premisa anterior como sustento a la necesidad de la inclusión del parámetro toxicidad en el IRCA.

Por otro lado, al obtener una sensibilidad tan alta en los ensayos de inhibición de crecimiento con micro algas *S. capricornutum* respaldado con una mortalidad de más del 30% de las muestras con el bioensayo con *Daphnia magna*, se puede sospechar de la presencia de pesticidas, plaguicidas y herbicidas en las fuentes de las cuales se capta el agua para la planta de potabilización, por lo cual la implementación de los bioensayos dentro del IRCA, también pueden convertirse en una medida indirecta de calidad de agua cruda. Esto concuerda con el estudio realizado sobre el río Yangtze en China donde se aplicó una metodología combinada de indicadores biológicos con parámetros físicoquímicos, según Directiva del Marco Europeo DMA, encontrando la respuesta en cuanto a efectos potenciales y toxicidades integradas o relacionadas con compuestos químicos monitoreados mejorando así las matrices ambientales de riesgo de las fuentes de captación de agua. (PIGNATA et al, 2013).

Si bien los resultados obtenidos en los ensayos toxicológicos con organismos son una primera medida de alarma, es necesario hacer aclaraciones respecto a los bioensayos realizados; primero el hecho que los organismos usados (*D. magna* y *S. capricornutum*)

sólo son indicadores de la presencia de sustancias o compuestos adversos a la salud o tóxicos; por lo cual los datos conseguidos no pueden ser extrapolados a posibles efectos en humanos, por lo cual sólo se puede considerar como un potencial peligro o amenaza, aumentando el riesgo por consumo del agua potable, pues se puede sospechar de la presencia de sustancias nombradas en párrafos anteriores. (Pesticidas, Herbicidas y subproductos del proceso de potabilización).

Ya para finalizar, del análisis de resultados surgen dos grandes premisas, una relacionada con el proceso de desinfección en las plantas de potabilización de la Sabana de Bogotá y alrededores, pues el alto contenido de Coliformes presentes en las muestras y los valores reportados de estudios anteriores indican que es posible que hayan deficiencias en la desinfección, que hay una re-contaminación en las redes de distribución, o que los usuarios no están limpiando los tanques de almacenamiento de las viviendas, como es su responsabilidad.

Estos resultados están mostrando que al no ser obligatorio medir todos los parámetros del IRCA, se deja a un lado la medición metales como el Aluminio, Zinc, Hierro y Molibdeno, y con ello que no se pueda contar con una primera medida de la presencia de dichos elementos que pueden llegar a generar toxicidad y consecuencias graves para la salud por su exposición prolongada así sea a bajas concentraciones; como es el caso del aluminio que se trató con anterioridad en este aparte de discusión, o el caso del Plomo que es un metal presente en redes de distribución de agua por los materiales con los cuales se construyó, y del cual se ha registrado que causa 600.000 caso por año de discapacidad intelectual en la población infantil en el mundo (SANCHEZ et al, 2012). Esto también se refleja en los resultados de calcular el IRCA básico y el IRCA completo (tabla 10), observando que el nivel de riesgo se mantiene con ambas evaluaciones, inclusive cuando se ve una variación es para disminuir el nivel de riesgo (pasa de riesgo alto a medio en las muestras 9, 23 y 24), lo que muestra que la evaluación de riesgo depende altamente de los resultados microbiológicos, y no genera un impacto mayor la inclusión de otros parámetros como los metales, por lo que las consecuencias para la salud a largo plazo se estaría subestimando.

Complementando esta última información, Colombia al tener una alta actividad minera es muy propensa a contaminar sus fuentes hídricas con la presencia no sólo de los metales

evaluados en el IRCA sino de otros más perjudiciales como lo son el mercurio o los metales ya nombrados en el párrafo anterior, los cuales no son fácilmente removidos con los procesos de potabilización con los que actualmente cuenta el país, (MANCERA, 2016; MARRUGO & HERNANDEZ, 2016; ENA, 2014), por lo cual es necesario generar un vínculo entre la contaminación con metales y la evaluación de toxicidad para futuras investigaciones de evaluación de calidad de agua para consumo humano siendo esta otra razón más para justificar la inclusión del parámetros de toxicidad total en el IRCA.

En concordancia con el anterior análisis, también se puede inferir que el uso de bioensayos puede ser una primera medida de evaluación de sustancias que sólo son recomendadas medir en la resolución 2115 de 2007, pues al tener un resultado positivo para toxicidad total sería necesario indagar que compuestos pueden estar causando dicha ecotoxicidad.

Por otro lado, se evaluó estadísticamente si había alguna correlación entre los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos (todos en general no sólo de los 4 con algún porcentaje de incumplimiento sobre el total de las muestras) y los dos bioensayos realizados, utilizando el software R, para estudiar si existe algún tipo de relación con entre estos últimos y los parámetros fisicoquímicos.

Cabe aclarar que con el fin de evitar “ruidos” en los datos o correlaciones erróneas fue necesario descartar los valores de los ensayos de parámetros que cuenten con datos constantes como es el caso de los Fosfatos, Nitritos, Hierro, Manganese cuyos resultados son menores a los límites de detección, y *E. coli* donde no se registró presencia de unidades formadoras de colonias; obteniendo así los resultados presentados en los Reportes 12 y 13 del Anexo D. Este análisis arrojó como resultados que no hay correlación entre los parámetros medidos y los resultados de toxicidad, lo que indicaría que, posiblemente, estos resultados de toxicidad se deben a otras sustancias que no se están analizando.

También se analizó la dependencia de variables no en conjunto sino de forma individual, por medio de un estudio de varianza (ANOVA), que permite evaluar si una variable tiene influencia sobre otra (correlación) a partir de los resultados que se tienen (BARÓN et al, 2004); estos resultados se presentan en el Reporte 15 del Anexo D, mostrando que los resultados tanto para la regresión del ensayo de mortalidad con *D.magna* como el de Inhibición con *S.capricornutum* indican que no existe dependencia real de los datos de los

parámetros medidos con los de los ensayos de toxicidad, por lo cual se puede afirmar que hay un agente no medido que puede incidir en los resultados.

## **6.1 PROPUESTA DE INCLUSIÓN DEL PARÁMETRO TOXICIDAD TOTAL DENTRO DEL IRCA MEDIANTE METODOLOGÍA DELPHI**

### **6.1.1 Escogencia de parámetros a modificar (ejercicio individual)**

Como se habló en la discusión de resultados, la contaminación o toxicidad no sólo se mide en exposiciones cortas a altas concentraciones, sino que también en concentraciones bajas a periodos de exposición prolongados, por lo cual es necesario evaluar los efectos de dichos contenidos menores de sustancias nocivas (VILLANUEVA et al, 2014); esto sumado a la carencia de medición de todos los parámetros involucrados en el IRCA, hace que sea necesario un método práctico que señale si existe o no sustancias en el agua que generen algún efecto nocivo. Y es allí cuando los bioensayos se convierten en una gran opción. Una vez identificada la necesidad de la evaluación de toxicidad, es prioridad señalar que parámetros que pertenecen al IRCA pueden ser modificados en su puntaje de riesgo para incluir los bioensayos como parámetros toxicológicos y así poder aplicar dicha conclusión en el método Delphi.

Es claro, como anteriormente se ha dicho que aquellos parámetros cuya implicación de riesgo en la salud humana sea alta no debe removerse del índice, pero si pueden ser usados para dar peso al potencial parámetro a incluir ya que estos son los que poseen un mayor valor dentro del parámetro; tal es el caso de los coliformes totales y fecales, cloro residual libre, la turbiedad, el color, el pH y el aluminio. Pero ¿cuáles de todos los anteriormente nombrados se deben modificar o no? Para resolver esta duda es necesario tomar uno a uno,

- Cloro residual libre (CRL): según la resolución 2115 de 2007 se entiende como CRL a la cantidad de cloro que queda en el agua después de un período de contacto definido, que reacciona química y biológicamente como ácido hipocloroso o como

ión hipoclorito. Su implicación en la salud radica que al no tener presencia del mismo en un punto de salida de Plantas de potabilización se puede inferir que el agua puede transportar agentes biológicos que potencialmente puede generar problemas de salud pública (CAMPO, 2003) aunque como se discutió en el análisis de datos el exceso de este incurre en generar sustancias tóxicas que al igual que los microorganismos también tienen incidencia en la salud. Dentro del IRCA su valor de ponderación es de 15 puntos siendo un candidato ideal para donar puntos a la toxicidad total, sin embargo, debe ser descartado primero por ser un parámetro directamente relacionado con la presencia o no de *E. coli* y Coliformes totales y segundo a su proporción de muestras incumplidas teniendo así que de las 25 muestras 4 infringieron el rango permisible, habiendo lecturas de CRL por debajo o por encima de dicho rango.

- Color: es considerado la mayor parte de las veces como un parámetro netamente estético, sin embargo, cuando el agua cuenta con algún tipo de coloración se puede intuir la presencia en altas concentraciones de metales como el Hierro, no obstante, no hay indicios que demuestren que beber agua coloreada pero tratada tenga alguna incidencia en la salud, por lo cual es un candidato perfecto para para realizar la reformulación.
- Turbiedad: Al igual que el Color es considerado un parámetro estético sin embargo la medida de turbiedad o turbidez en el agua puede indicar la presencia de materia insoluble, coloidal que puede generar problemas al consumirlas junto con el agua, siendo un parámetro importante para la calificación de la eficiencia de procesos de coagulación y desinfección en el tratamiento de potabilización del agua pues se tiene la relación que a menor turbiedad se tiene menor presencia de agentes bacterianos<sup>10</sup>, presentes en partículas que transporta el agua como se explicó al comienzo del párrafo . Su valor dentro del IRCA es igual al de cloro residual libre, 15 puntos y dado a su regular evaluación y cumplimiento es un parámetro perfecto para ser incluido dentro de la reformulación.
- Coliformes totales y fecales: son los dos únicos parámetros de evaluación microbiológica dentro del índice de calidad, siendo más importante la evaluación de coliformes fecales por su implicación en aparición de enfermedades, en caso

---

<sup>10</sup> <https://goo.gl/1oBzuG>

que se compruebe su presencia en el agua de consumo humano; por lo cual se corre un riesgo muy alto si se modifica el valor asignado a *E. Coli* (parámetro con mayor peso de ponderación, igual a 25 puntos de los 100 del IRCA); por otro lado, los coliformes totales al ser más generales es normal que llegue a presentarse falsos positivos en los reportes de los datos, por lo cual si hubiera un parámetros microbiológico a modificar sería este último.

- Metales (Aluminio, Hierro, Zinc, Molibdeno y Manganeso): son conocidos por su alta capacidad de reacción con diferentes elementos, dicha característica los hace altamente riesgosos por generar sustancias con potencial efecto sinérgico; aun así, rara vez son evaluados dentro del cálculo del IRCA, sumando a los 5 metales nombrados se tiene un total de 8 puntos (casi el 10% del total del parámetro), desperdiciando puntos que pueden ser donados a la evaluación de toxicidad.

Teniendo en cuenta el anterior análisis y la priorización de parámetros o indicadores dada en el artículo 7 del decreto 475 de 1998, derogado por el art. 35, del Decreto Nacional 1575 de 2007. Se diligenció una encuesta incluida dentro del método Delphi en la cual se modifican los mismos indicadores del IRCA, pero varía el puntaje de riesgo de la ponderación, donando una parte de estos para cada bioensayo.

Se decidió finalmente plantear la modificación de los puntajes de riesgo de los metales presentes en la evaluación del IRCA, ya que según la bibliografía son los elementos encontrados en el agua que pueden reaccionar más fácilmente con otras sustancias y originar efectos adversos en la salud humana, por lo cual son los parámetros candidatos a la nueva reformulación. Esto sustentado en los estudios de toxicidad con metales pesados hechos por las universidades de la Salle (QUINTERO, 2010), la Javeriana (BOHÓRQUEZ et al, 2014) y la Nacional (GARZÓN, 2002) los cuales coinciden con las conclusiones del ensayo realizado por César Augusto Mac-Quhae. en el 2003.

Adicional a ello, se disminuye los pesos de puntaje de riesgo de la turbiedad y los coliformes totales al necesitar un mayor valor de ponderación para cada bioensayo.

Tabla 15 : Selección de parámetros y modificación de puntaje de riesgo propuesta para incluir en ejercicio Delphi (Encuesta).

<b>Selección para incluir en ejercicio de Metodología Delphi</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Puntaje IRCA actual</b>	<b>Puntaje IRCA propuesto</b>	<b>P. Gana Tox</b>
Aluminio	3	2	1
Hierro	1.5	1	0.5
Zinc	1	0.5	0.5
Molibdeno	1.5	1	0.5
Manganeso	1	0.5	0.5
Coliformes T	15	12	3
Color verdadero	6	4	2
Turbiedad	15	10	5
<b>TOTAL</b>			<b>13</b>
<b>5 puntos para <i>D.magna</i> y 8 para <i>S.capricornutum</i></b>			

Con los resultados de estas modificaciones, se completa una opinión para ser incluida dentro de la metodología Delphi básica a aplicar, ya que esta castiga severamente los parámetros evaluados teniendo valores de IRCA más altos en comparación con la actual ponderación de parámetros (ver tabla 16), dando valores con mayores grados de riesgo para consumo en las muestras, esto último es el resultado de haberle dado un mayor peso al ensayo con microorganismos vegetales por su alta sensibilidad, ponderando el parámetro toxicidad no por partes iguales sino dando 8 puntos de 100 para muestras positivas ante toxicidad crónica con *Selenastrum capricornutum* (estudio de inhibición de biomasa en un tiempo de exposición de 72 horas) y 5 puntos de 100 para muestras positivas ante toxicidad aguda con *Daphnia magna* (estudio de mortalidad de población de neonatos en un tiempo o periodo de exposición de 48 horas).

Cabe resaltar que al hacer el ejercicio con el fin de responder la encuesta del método Delphi se obtuvo muestras con IRCAs más altos (puntajes de riesgo más alarmantes), pasando de un 4% de muestras en riesgo alto al 16%, igual pasa con las muestras evaluadas como agua sin riesgo de consumo, pasando del 44% de las muestras a el 0%; tal y como se evidencia en la Tabla 16.

Tabla 16 Resultados del ejercicio individual para ser incluido en el método Delphi.

Listado Muestras	IRCA ACTUAL		OPINIÓN MODIFICACIÓN AUTORA		Toxicidad D.magna	Toxicidad S.capricornutum
	E. Cuantitativa	E. Cualitativa	E. Cuantitativa	E. Cualitativa		
M01	16,0%	MEDIO	21,1%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M02	0,0%	SIN RIESGO	8,6%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M03	16,0%	MEDIO	21,1%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M04	0,0%	SIN RIESGO	8,6%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M05	0,0%	SIN RIESGO	8,6%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M06	0,0%	SIN RIESGO	8,6%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M07	17,6%	MEDIO	22,6%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M08	0,0%	SIN RIESGO	8,6%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M09	33,0%	MEDIO	37,6%	ALTO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M10	16,5%	MEDIO	21,5%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M11	16,5%	MEDIO	21,5%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M12	16,5%	MEDIO	21,5%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M13	37,5%	ALTO	40,0%	ALTO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M14	17,6%	MEDIO	28,0%	MEDIO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M15	17,6%	MEDIO	28,0%	MEDIO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M16	17,6%	MEDIO	28,0%	MEDIO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M17	1,1%	SIN RIESGO	15,1%	MEDIO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M18	16,5%	MEDIO	24,7%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M19	0,0%	SIN RIESGO	13,7%	BAJO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M20	0,0%	SIN RIESGO	14,0%	BAJO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M21	0,0%	SIN RIESGO	8,4%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M22	0,0%	SIN RIESGO	8,6%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M23	33,5%	MEDIO	38,4%	ALTO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M24	33,5%	MEDIO	43,7%	ALTO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M25	0,0%	SIN RIESGO	14,0%	BAJO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
	Resumen		Resumen		<i>El 32% marcó ecotoxica en ambos bioensayos para las 25 muestras analizadas por completo</i>	
	ALTO	4%	ALTO	16%		
	MEDIO	52%	MEDIO	44%		
	BAJO	0%	BAJO	40%		
	SIN RIESGO	44%	SIN RIESGO	0%		

## **6.2 Aplicación *metodología Delphi* para la evaluación de inclusión del parámetro Toxicidad.**

### **6.2.1 Generalidades**

Como primer paso y antes de explicar cómo fue la implementación de la metodología Delphi, se debe hacer aclaraciones/consideraciones sobre ciertos puntos tenidos en cuenta para el diseño de las encuestas para el desarrollo de la metodología de formulación del índice.

- El Parámetro toxicidad se evaluó por medio de dos bioensayos los cuales según el análisis de datos obtenidos en el laboratorio son independientes al resto de parámetros medidos por lo cual los bioensayos pueden ser incluidos de forma directa en el IRCA, proponiendo de esta forma tres (3) clases de parámetros de evaluación (Físicoquímicos, Microbiológicos, Toxicológicos); pasando así de 21 parámetros a 23 cuyos valores de riesgo para el cálculo del IRCA sumarán 100 puntos.
- Las encuestas fueron enviadas vía correo electrónico para que cada experto resolviera su documento de forma individual y evitar sesgos por comentarios o experiencias de terceros.
- Cada encuestado fue libre para decidir cómo modificar los 21 parámetros actuales y de incluir o no los bioensayos por lo cual los anexos de las encuestas contaron únicamente con el resumen de los resultados obtenidos en el laboratorio (parámetros que incumplieron en algún porcentaje del número de muestras los límites admisibles expuestos en la resolución 2115 de 2007) y los datos obtenidos de los bioensayos realizados en porcentaje de incumplimiento o no.
- El análisis realizado en un comienzo (numeral 7.1.) fue incluido como una encuesta más y refleja el punto de vista de la autora del presente trabajo, cabe resaltar que dicha escogencia de parámetros a modificar no fue conocida por los demás encuestados.
- La modificación fue planteada exclusivamente para el valor de riesgo asignado en cada parámetro más el valor admisible de los ensayos en laboratorio.

Partiendo de estas premisas y teniendo como guía el ejercicio de metodología Delphi realizado para el diseño de un índice de calidad de agua en Ciénagas de la región Caribe colombiana más específicamente en el departamento de Atlántico (MANCERA, 2016).

### **6.2.2 Selección de Expertos.**

Teniendo en cuenta que los expertos deben tener idoneidad en temas que abarcan ensayos fisicoquímicos y microbiológicos hasta políticas de monitoreo y control de calidad de agua es necesario invitar a diligenciar la encuesta a docentes de diferentes universidades con experiencia en ingeniería ambiental, saneamiento y gestión integral de recursos hídricos al igual que profesionales de los diferentes entes de vigilancia como secretarías de salud, acueductos y laboratorios privados que evalúen muestras de agua; involucrando de esta forma tanto al sector privado como al público; encontrando dentro de los encuestados trabajadores, docentes y coordinadores de entidades y universidades como:

- Universidad Nacional de Colombia.
- Secretaria de Salud de Cundinamarca.
- Secretaria distrital de salud (Bogotá D.C.).
- Universidad Central.
- Laboratorios Chalver de Colombia S.A.
- Universidad de Antioquia.
- Corola Ambiental S.A.S.
- Secretaria Distrital de Ambiente (Bogotá D.C.).
- Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá EAB.
- Universidad de Córdoba.

En cuanto al número de expertos necesario para llevar a cabo la metodología Delphi, se decidió enviar alrededor de 20 invitaciones de las cuales se tuvo respuesta de 8 personas idóneas en un periodo de 15 días hábiles, según literatura el número de expertos en un panel Delphi puede variar de 6 a 30 colaboradores (MANCERA, 2016)

### 6.2.3 Análisis de la información Cualitativa obtenida.

Si bien las encuestas diligenciadas por cada especialista (incluyendo la propuesta propia) varían en parámetros candidatos para modificación también lo hace en la respuesta a la pregunta si incluirían algún otro parámetro además de los bioensayos, esto hace tener una idea de las necesidades de estudios enfocados a la salud que actualmente tiene la comunidad científica, viéndose reflejado en comentarios como:

- *“Se considera importante incluir el análisis de virus y protozoos, debido a que diversas investigaciones han demostrado la relación de estos organismos con enfermedades principalmente gastrointestinales, (...) puntajes semejantes al componente microbiológico en el IRCA.”* Experto No.7
- *“Plaguicidas”* Experto No. 5
- *“Consideraría la inclusión de –al menos- tres metales pesados de gran importancia ambiental y de salud pública: mercurio, arsénico y plomo. (...) De igual manera, recomiendo considerar contaminantes emergentes en agua como COP’s y medicamentos.”* Experto No.3
- *“Incorporar los bioensayos o la determinación de parámetros como el Mercurio. Esto, teniendo en cuenta el manejo irresponsable que se está dando a este elemento en la explotación de oro en muchas cuencas del país y su efecto tóxico y peligroso”* Experto No.2
- *“Compuestos emergentes como hormonas y fármacos que pueden llegar a los cuerpos de agua por escorrentía”* Experto No.1

Esto concuerda con resultados de investigaciones realizadas como por ejemplo la nombrada en el aparte o capítulo 2 del presente trabajo, la cual fue realizada en Perú y donde los esfuerzos se enfocaron a biomonitoreo de metales pesados como Cromo y Plomo en fuentes de captación de agua, ¿Qué pasaría si se realizaran bioensayos a la entrada y salida de una planta de potabilización? ¿los bioensayos puede ser una medida para evaluar remoción de contaminantes en plantas de potabilización? ¿es posible identificar la presencia de metales pesados mediante las respuestas de microorganismos expuestos a posible agua contaminada?

Esto es el inicio de una hipótesis donde la implementación del parámetro Toxicidad, por medio de bioensayos, se usen como indicadores de la presencia o no de sustancias

adversas a la salud y a su vez sirvan como una medida indirecta de los otros parámetros propuestos por los expertos encuestados y de sustancias mencionadas en la resolución 2115 de 2017 que no se encuentran como parámetros dentro del índice (IRCA), pues de la misma forma como se tiene respuesta de los metales pesados también se puede tener de contaminantes emergentes como pesticidas, plaguicidas, herbicidas y fármacos que actúan como disruptores endocrinos o agentes cancerígenos convirtiéndose en agentes de riesgo a la salud (AINIA, 2013) tal y como lo evidencia libros como *La Primavera Silenciosa* de Rachel Carson donde se expone los daños perjudiciales de los pesticidas en el medio ambiente enfocándose hacia la disminución de la población de aves.

Desde el punto de vista económico también la implementación de bioensayos puede ser beneficiosa pues a partir de un número pequeño de ensayos se puede obtener información de los posibles contaminantes del agua y sus efectos en la salud.

#### **6.2.4 Análisis de la información Cuantitativa obtenida.**

En cuanto al análisis de variables cuantitativas cabe recordar que en este punto abarca el manejo de datos de la primera pregunta de la encuesta y se centra en el número de parámetros que modificaría el encuestado y el nuevo valor que le asignaría a cada uno de ellos. Ahora dado a que el IRCA fue formulado de tal forma que al no cumplir una concentración o rango (caso del pH y Cloro Residual Libre) se le asigna un valor único de riesgo no es necesario plantear curvas de función como las usadas en otros índices a nivel mundial como por ejemplo el WQI (Water Quality Index) de la NSF (National Sanitation Foundation) de los Estados Unidos donde el valor de riesgo para cada uno de los parámetros depende de su respectiva curva de función. (FERNÁNDEZ et al, 2005).

En concordancia con lo anteriormente dicho y habiendo hecho la salvedad de las curvas de función en la tabla 18 se puede observar el resumen de los parámetros y valores asignados por los miembros del Panel de expertos.

Tabla 17 Listado de parámetros actuales propuestos por el panel de expertos para modificación.

PARÁMETROS	EXPERTO 1	EXPERTO 2	EXPERTO 3	EXPERTO 4	EXPERTO 5	EXPERTO 6	EXPERTO 7	EXPERTO 8	LDMR EXPERTO 9	Número de Coincidencias	Promedio Valor Nuevo Expertos
Alcalinidad Total						X				1	2.0
Aluminio (Al+3)	X			X		X			X	4	3.0
Cloruros		X								1	0.0
Coliformes Totales	X			X					X	3	7.3
Color Aparente	X	X		X	X	X		X	X	7	3.9
COT	X							X		2	4.0
CRL								X		1	9.0
Dureza Total						X				1	2.0
E. coli			X	X						2	21.5
Fluoruros			X							1	1.5
Fosfatos			X							1	2.0
Hierro Total		X		X					X	3	1.0
Manganeso							X		X	2	1.0
Molibdeno									X	1	1.0
Nitratos			X							1	1.5
Nitritos				X						1	4.0
pH	X	X		X		X	X			5	1.3
sulfatos			X							1	2.0
Turbiedad		X			X	X		X	X	5	10.2
zinc			X						X	2	1.3

En la tabla 17 se puede ver resumido el total parámetros actuales que fueron escogidos de forma individual por el panel para ser considerados para cambio dentro de la nueva ponderación de riesgo que se diseña mediante metodología Delphi. Sin embargo, aunque la tabla muestra un total de 20 parámetros, no todos ellos serán modificados pues se necesita tener en cuenta las siguientes consideraciones para ser modificados:

- Al menos un tercio del número total de expertos del panel deben estar de acuerdo para su modificación (Por lo menos 3 expertos debieron marcarlo como candidato de reasignación de valor de riesgo).
- El promedio del valor de riesgo propuesto por los expertos debe ser diferentes al valor actual con el que cuenta para el cálculo del IRCA.

Así pues, se pasa de tener 20 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a contar tan sólo con 5 parámetros. (Ver Tabla 18).

Tabla 18 Selección final de parámetros para modificación de su actual puntaje de riesgo en el IRCA.

PARÁMETROS	Amplitud de valores	Número de Coincidencias	Promedio Valor Nuevo Expertos (A)	Valor actual Parámetro (B)	Diferencia Valores (A-B)	% de Expertos que consideran un cambio	Aceptación de análisis del parámetro (>30% de los expertos)	Aceptación de análisis del parámetro (>30% de los expertos)
Coliformes Totales	7.0	3.0	7.3	15.0	7.7	33%	ACEPTADO	CANDIDATO A MODIFICACIÓN
Color Aparente	3.0	7.0	3.9	6.0	2.1	78%	ACEPTADO	CANDIDATO A MODIFICACIÓN
Hierro Total	0.0	3.0	1.0	1.5	0.5	33%	ACEPTADO	CANDIDATO A MODIFICACIÓN
pH	1.5	5.0	1.3	1.5	0.2	56%	ACEPTADO	CANDIDATO A MODIFICACIÓN
Turbiedad	5.0	5.0	10.2	15.0	4.8	56%	ACEPTADO	CANDIDATO A MODIFICACIÓN

Tabla 19 Expertos del panel que aprueban la implementación de los bioensayos como parámetros Toxicológicos del IRCA.

PARÁMETROS	EXPERTO 1	EXPERTO 2	EXPERTO 3	EXPERTO 4	EXPERTO 5	EXPERTO 6	EXPERTO 7	EXPERTO 8	LDMR EXPERTO 9	Número de Coincidencias	Promedio Valor Nuevo Expertos
Bioensayo con <i>D. magna</i> (Mortalidad a 48 horas)	X	X		X		X	X	X	X	7	5.1
Bioensayo con <i>S. capricornutum</i> (Inhibición de crecimiento a 72 horas)	X	X		X		X	X	X	X	7	5.4

La tabla 18 nos muestra 5 parámetros seleccionados para modificación entre los cuales se tiene diferentes tipos de parámetros: 1 microbiológico, 1 metal y 3 físicos. Estos junto con la decisión de implementar los 2 bioensayos trabajados como parámetros toxicológicos (Ver tabla 19) serán el centro de la nueva propuesta de formulación del IRCA.

Cabe aclarar que aunque 7 expertos del panel creen necesario incluir los bioensayos dentro del cálculo del IRCA, Sólo 6 dieron un puntaje de inclusión puesto un experto sugiere implementarlo como medida primaria y fusionarlo con los mapas de riesgo municipales para dar un primer acercamiento al tipo de riesgo que puede tener la población, esta última premisa concuerda con una de las hipótesis iniciales que se tenían del índice sin embargo al realizar los ensayos se puede evidenciar que la presencia de agentes tóxicos es muy alta por lo cual es indispensable incluirlos coincidiendo así con la opinión de los otros 6 expertos (incluyendo la autora).

### **6.2.5 Propuesta final Panel de Expertos para la reformulación del puntaje de Riesgo por parámetro en el IRCA.**

Finalmente, una vez seleccionados los 5 parámetros a reformular y llegar a un consenso dentro del panel para implementar los bioensayos como parámetros toxicológicos dentro del IRCA se procede a dar manejo a los puntajes de reformulación de riesgo para los 7 parámetros vistos de forma global dentro del IRCA.

Inicialmente se pensó en usar los puntajes promedio hallados por la opinión del panel sin embargo al sumar la totalidad de los parámetros ya no se tenía un puntaje global de riesgo de 100 puntos sino de 95.2 puntos, lo cual indicaba que no era necesario disminuir a esas proporciones los 5 parámetros seleccionados a reformular. En busca de solución de este inconveniente y para no hacer a un lado la opinión dada por el panel de expertos que diseñó en un comienzo el índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano IRCA, se decide realizar un nuevo promedio entre el antiguo y nuevo puntaje de riesgo para llegar a un equilibrio de proporciones de importancia dentro del IRCA buscando una cifra redondeada que mejor se ajuste a los 100 puntos de riesgo. Así pues, se obtiene la propuesta final como aquella que cumple lo anteriormente dicho y cuyo redondeo se realizó por debajo de las cifras significativas que contaba. (Ver tabla 20)

NOTA: En la tabla 21 se puede observar cómo evalúa esta nueva propuesta el riesgo con consumo del agua potable sobre las 25 muestras trabajadas a lo largo del actual trabajo.

La reformulación resultante de aplicar la metodología Delphi muestra un cambio significativo en los puntajes de riesgo bajos, pasando de 0% con la actual evaluación a 44% mientras que las muestras que indicaban no tener riesgo pasaron a ser nulas. Sin embargo, para los niveles de riesgo medio y alto se conservan los porcentajes, teniendo un 52% en riesgo medio y un 4% en riesgo alto, esto significa que la propuesta para la nueva formulación de puntajes de riesgo tiene mayor incidencia en muestras de puntajes bajos de riesgo, siendo más estricta en agua potable que cuente con mejores procesos de desinfección y potabilización en general.

Tabla 20 Propuesta final de puntajes de riesgo incluyendo los dos parámetros toxicológicos (Bioensayos) en el IRCA

<b>Característica</b>	<b>Puntaje de Riesgo Actual</b>	<b>Propuesta final de modificación de puntaje de Riesgo (redondear Abajo)</b>
Alcalinidad Total	1	1
Aluminio (Al+3)	3	3
Calcio	1	1
Cloro Residual Libre	15	15
Cloruros	1	1
Coliformes Totales	15	11
Color Aparente	6	4
COT	3	3
Dureza Total	1	1
<i>Escherichia Coli</i>	25	25
Fluoruros	1	1
Fosfatos	1	1
Hierro Total	1.5	1
Magnesio	1	1
Manganeso	1	1
Molibdeno	1	1
Nitratos	1	1
Nitritos	3	3
pH	1.5	1
Sulfatos	1	1
Turbiedad	15	12
Zinc	1	1
Bioensayo con <i>D. magna</i> (Mortalidad a 48 horas)	No Aplica	5
Bioensayo con <i>S. capricornutum</i> (Inhibición de crecimiento a 72 horas)	No Aplica	5
Sumatoria de puntajes asignados	100	100

Tabla 21 Resumen Evaluación Propuesta IRCA

Listado Muestras	IRCA ACTUAL		PROPUESTA DELPHI		Toxicidad D.magna	Toxicidad S.capricornutum
	E. Cuantitativa	E. Cualitativa	E. Cuantitativa	E. Cualitativa		
M01	16,0%	MEDIO	16,8%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M02	0,0%	SIN RIESGO	5,4%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M03	16,0%	MEDIO	16,8%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M04	0,0%	SIN RIESGO	5,4%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M05	0,0%	SIN RIESGO	5,4%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M06	0,0%	SIN RIESGO	5,4%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M07	17,6%	MEDIO	18,5%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M08	0,0%	SIN RIESGO	5,4%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M09	33,0%	MEDIO	33,7%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M10	16,5%	MEDIO	17,4%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M11	16,5%	MEDIO	17,4%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M12	16,5%	MEDIO	17,4%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M13	37,5%	ALTO	34,8%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M14	17,6%	MEDIO	23,9%	MEDIO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M15	17,6%	MEDIO	23,9%	MEDIO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M16	17,6%	MEDIO	23,9%	MEDIO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M17	1,1%	SIN RIESGO	12,0%	BAJO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M18	16,5%	MEDIO	21,7%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M19	0,0%	SIN RIESGO	10,5%	BAJO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M20	0,0%	SIN RIESGO	10,9%	BAJO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M21	0,0%	SIN RIESGO	5,3%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M22	0,0%	SIN RIESGO	5,4%	BAJO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M23	33,5%	MEDIO	33,7%	MEDIO	NO ECOTOXICA	ECOTOXICA
M24	33,5%	MEDIO	38,9%	ALTO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
M25	0,0%	SIN RIESGO	10,9%	BAJO	ECOTOXICA	ECOTOXICA
	Resumen		Resumen		<i>El 32% marcó ecotoxica en ambos bioensayos para las 25 muestras analizadas por completo</i>	
	ALTO	4%	ALTO	4%		
	MEDIO	52%	MEDIO	52%		
	BAJO	0%	BAJO	44%		
	SIN RIESGO	44%	SIN RIESGO	0%		

### 6.3 Incertidumbres, Restricciones y Limitaciones.

Para la realización de la presente tesis de maestría, hay que plantear las restricciones e incertidumbres sobre el alcance de la investigación planteada, en primer lugar, aclarar que el trabajo está enfocado al aspecto técnico de la evaluación de la calidad de agua potable en Colombia, por lo cual se debe tener en cuenta las siguientes limitaciones para la potencial inclusión del parámetro toxicidad por medio de la evaluación de dos bioensayos:

- Al contar con dos organismos en la batería de bioensayos que evalúa el parámetro toxicidad, no es posible escalar los efectos tóxicos al nivel humano, en este orden de ideas, las pruebas con *D. magna* y *S. capricornutum* sólo indicarán la presencia o no de agentes o sustancias tóxicas.
- Se hace necesario un estudio socioeconómico adicional a nivel municipal para calcular los costos de la infraestructura, materiales, equipos y personal básico para la implementación de los dos parámetros de evaluación toxicológica de agua potable, este estudio también debe abarcar la capacitación de dicho personal en el manejo de los dos bioensayos.
- Mediante la presente tesis de maestría se pretenden identificar agentes tóxicos en el agua potable para consumo humano, sin embargo para la posible implementación de los dos bioensayos que identifica dicha presencia de toxicidad es importante establecer en caso de ser aceptada la propuesta, el periodo o la frecuencia con la cual se realizaría dichas pruebas, (mensual, semestral o anual), esta restricción o limitación estaría relacionada directamente al número de habitantes o al tamaño de la población a la cual abastece la planta de potabilización que se le estable o calcula el índice de riesgo IRCA.
- En el aspecto jurídico es necesario escalar la propuesta a nivel ministerial pues de ser aceptada la inclusión de los 2 nuevos parámetros de evaluación de toxicidad por parte de los entes de vigilancia y control (como es el caso del Instituto Nacional de Salud); se tendría que modificar artículos y resoluciones nacionales que actualmente rigen la evaluación de la calidad de agua potable, por ejemplo la resolución 2115 de 2007 en la cual se formula el IRCA como índice de riesgo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Aunque en la mayoría de las muestras hubo cumplimiento de los análisis realizados, el alto porcentaje de incumplimiento en el parámetro de Coliformes totales hace que sólo el 44% de las muestras de agua potable sean consideradas sin riesgo para consumo humano.
- Se utilizaron dos bioensayos para evaluar la toxicidad, con *Daphnia magna* y *S. capricornutum*, presentando este último mayor sensibilidad a los tóxicos en las muestras de agua potable, ya que el total de las pruebas sobre las 25 muestras dieron resultados positivos de toxicidad (100% de las muestras evaluadas).
- La inclusión del parámetro de toxicidad total en la evaluación del IRCA, incremento el número de muestras con un nivel de riesgo bajo por consumo pasando de 0 muestras con el actual puntaje de riesgo a 11, por lo cual el nuevo parámetro desagregado en dos indicadores o bioensayos hace más riguroso el IRCA.

Para futuros trabajos se recomienda:

- Para futuras investigaciones sería bueno incluir bioensayos con los cuales se pueda evaluar efectos sub letales, pues para algunas muestras valoradas con *D. magna* hubo una mortalidad que no superó la presentada en el control positivo (tóxico de referencia en una concentración a la cual muere la mitad de la población de *D. magna* - CL<sub>50</sub>). Se recomienda el uso de *Hydra attenuata*, pues esta puede mostrar en un corto periodo de tiempo (96 horas) si existen agentes o sustancias que produzcan algún tipo de efecto nocivo, siendo un buen comienzo para la inclusión de técnicas para medir daños generados por subproductos de los procesos del tratamiento de potabilización del agua.
- En futuros trabajos donde se piense extrapolar a humanos los efectos de la presencia de sustancias tóxicas en bioensayos, es necesario ampliar el número

de estos, desde el nivel genético hasta macroinvertebrados para que dicha magnificación pueda obtener resultados más cercanos a la realidad vivida por exposición y consumo de agua tratada (potable) que contenga sustancias tóxicas. Cabe resaltar que la toxicidad total no fue el único parámetro que definió el nivel de riesgo del agua potable, es necesario que los acueductos hagan un seguimiento de la calidad de agua que producen sus Plantas con el fin de actualizar mapas de riesgo para futuros trabajos en comunidades municipales, pues menos de la mitad de las muestras analizadas con la formulación actual y propuesta del IRCA cuentan con una evaluación “sin riesgo para consumo”.

- Se recomienda realizar un estudio de optimización de procesos de tratamiento de agua potable según los lineamientos de la Organización mundial de la Salud OMS, publicados en 2014 y los cuales son nombrados en la bibliografía del presente trabajo, además de realizar mantenimientos constantes a las redes de distribución y tanques de almacenamiento por parte de los diferentes actores (población beneficiada, empresas de servicio público, acueductos y gobiernos municipales).
- Se evidencia la necesidad de evaluar los efectos tóxicos de nuevas sustancias enmarcadas dentro del grupo de contaminantes emergentes, pues estos actualmente no son monitoreados ni regulados de forma rigurosa por los entes de control; la implementación de bioensayos en evaluación de agua potable da una luz de la existencia de estos compuestos o sustancias que pone en riesgo la salud de los consumidores directos.
- Para futuros trabajos es necesario evaluar fuentes provenientes de otros departamentos de Colombia, pues el presente trabajo contó con muestras de Cundinamarca exclusivamente, por lo cual se evidencia la necesidad de estudiar fuentes de agua potable externas para realizar un diagnóstico general del país en cuanto a la presencia o no de agentes tóxicos en el agua de consumo.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguado, J. (2009). Toxicidad: Las Aguas contaminadas pueden “feminizar” a los machos. Universidad de Alcalá. Recuperado 10, 2014, de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2009/02/06/112396>

Alberti, M & Parker J, Indices of environmental quality: The search for credible measures. Environmental impact assessment review, Vol 11 , 1991. Recuperado de Fernández et al, 2005.

Ania, Restos de antibióticos en aguas: El problema de los contaminantes emergentes, Centro tecnológico ANIA, España, año 2013. <https://goo.gl/n5s7BR>

APHA, 1998, Standard methods for the examination of water and wastewater, edición 20, Washington D.C.

APHA, 2012, Standard methods for the examination of water and wastewater, edición 22, Washington D.C.

Ball R & Church R, Water quality indexing and scoring, Journal of the environmental engineering division, American society of civil engineers, edición EE4- 757-771 , 1980.

Barón F & Téllez F; Apuntes de bioestadística: Tercer ciclo en ciencias de la salud y medicina, Capitulo 5, Dpto. Medicina preventiva y Salud pública, Universidad de Málaga, España, 2004. <https://goo.gl/UtuWm9>

Bierkens J, Klein G, Corbisier P, Van Den Heuvel R, Verschaeve L, Weltens R, Schoeters G (1998): Comparative sensitivity of 20 bioassays for soil quality. Chemosphere, 37: 2935-2947.

Bohorquez, O. & Cáceres, L., 2002. Puesta a punto de una batería de bioensayos con *Hydra attenuata*, *Daphnia magna*, *Lactuca sativa* y *Allium cepa* para evaluar toxicidad en agua. Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Bohórquez-Echeverry, P., & Campos-Pinilla, C. Evaluación de *Lactuca sativa* Y *Selenastrum capricornutum* como indicadores de toxicidad en aguas. Universitas Scientiarum, 12(2), 17. (diciembre de 2007).

Bohórquez-Echeverry, P., Duarte-Castañeda, M., León-López, N, Caicedo-Carrascal, F., Vásquez-Vásquez, M., Campos-Pinilla, C. 2012. Selection of a bioassay battery to assess toxicity in the effluents and influents of three water-treatment plants. Jstor. Recuperado 11, 2014, de [www.javeriana.edu.co/universitas\\_scientiarum](http://www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum)

Boorman, V. D., June K. D., Chapin, R.E., Hunter, S., Hauchman, F., Gardner, H., Cox, M., and Sills, R., 1999. Drinking Water Disinfection Byproducts: Review and Approach

to Toxicity Evaluation. Environmental health perspectives. Jstor. Recuperado 11, 2014. <http://www.jstor.org/stable/3434484>.

Cáceda, C., 2011. Aplicación de Bioensayos en la medición de toxicidad por metales pesados en fuentes superficiales de agua para consumo humano. Ciencia y Desarrollo. Recuperado 10, 2014, de <http://www.unibg.edu.pe/coin2/pdf/01011000706.pdf>

Campo C, Determinación de ácidos haloacéticos en el agua potable de la ciudad de Bogotá, Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá DC, 2003

Carson R, Silent Spring, 1962 Recuperado New York Times – book en 2017 [http://www.nytimes.com/books/97/10/05/reviews/carson-spring.html?\\_r=1&oref=slogin](http://www.nytimes.com/books/97/10/05/reviews/carson-spring.html?_r=1&oref=slogin)

CEPAL, Objetivos de desarrollo del milenio, objetivo 7 – Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente, descripción y situación actual de los países respecto a las metas, 2011 <http://www.cepal.org/mdg/go07/>

Colgan A, Hankard Pk, Spurgeon Dj, Svendsen C, Wadsworth Ra, Weeks Jm (2003): Closing the loop: a spatial analysis to link observed environmental damage to predicted heavy metal emissions. Environmental Toxicology and Chemistry, 22: 970–976.

Corzo C; Mendoza M; Pérez Y, Metodología para la formulación de Indicadores, Secretaria distrital de Desarrollo Económico, Dirección de Estudios socioeconómicos y regulatorios, Alcaldía de Bogotá, Bogotá, 2007

Couillard, D. & Y. Lefebvre, Analysis of water quality indices. Journal Environmental Management 21:161-179.,1985.

Day, K.E., Ongley, E.D., Scroggins, R.P. & Eisenhauer, R.P., “Biology in the New Regulatory Framework for Aquatic Protection”, Proceedings for the Alliston Workshop, National Water Research Institute (Burlington, Ontario) and Environment Canada (Ottawa). 1988

Decreto 475, numeral 11 del artículo 189 de la constitución política y en desarrollo de las leyes 09 de 1979 y 142 de 1994, Diario oficial No. 43.259 Ministerio de Salud Pública, Presidencia de la república de Colombia, Bogotá DC, 1998.

Diaz C., Pica Y., Feola G., Sánchez A., Ronco A. & CIA; Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de agua. “Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones”; Centro internacional de investigaciones para el desarrollo; Instituto mexicano de tecnología del agua. 2004

DNP, Subdirección de Agua y saneamiento, Dirección de desarrollo urbano, Evolución de las Coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985-2013), DNP (2014)

Elendt B & Bias W; trace nutrient deficiency in Daphnia magna cultured in standard medium for toxicity testing effects of the optimization of culture conditions on life history parameters of Daphnia magna. Res 24. 1990

Fernández N, Ramírez A & Solano F, Índices fisicoquímicos de calidad del agua, un estudio comparativo, Artículo para la conferencia intercional usos múltiples del agua: Para la vida y el desarrollo sostenible, Universidad del Valle, 2003.

Fernández N; Solano F & Ramos G, Índices de calidad y de contaminación del agua, Capítulo II – Indicadores de la calidad del agua, Universidad de Pamplona, ISBN 958-33-7810-0, 2005

Garzón, C., 2002. Evaluación De La Calidad Toxicológica Y Microbiológica De La Fuente De Abastecimiento Del Municipio De Agua De Dios En Cundinamarca. Tesis de Maestria. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá DC.

Gómez M; Sobre el concepto del P valor, Dpto de estadística, Universidad Complutense de Madrid, año 2012 <https://goo.gl/PbERHf>

González A & González S; Notas Sobre R: Un entorno de programación para análisis de Datos y gráficos, Versión 1.0.1 año 2000. Recuperado Wikipedia 2017. <https://goo.gl/cypLZ3>

Guzmán B, Ministerio de Salud y Protección Social. Instituto Nacional de Salud. Calidad del Agua. Estado de la Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo humano – 2015, Calidad de Agua. Bogotá: INS, 2016. 199 p. ISSN: 2322-9497 , 2016.

Health Canada, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Table. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Ottawa - Ontario, 2017.

Hernández J, Introducción a la toxicología, Toxicología Alimentaria Diplomatura de nutrición humana y dietética; Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Madrid. 2011 <https://goo.gl/w2lxte>

House, M. A.; A water quality index for river management. Journal of the Institute of Water & Environmental Management 3: 336-344; 1989.

IARC, World Health Organization, Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, Some drinking water disinfectants and contaminants, Volumen 84 , Lyon, Francia 2004

Jiang, W., Yan, Y., Ma, M. Wang, D., Luo, Q, Wang, Z., Satyanarayanan, S.K., 2012. Assessment of source water contamination by estrogenic disrupting compounds in China. Journal of Environmental Sciences, Volume 24. Recuperado 11, 2014, de [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60746-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60746-8)

MACIAS L, Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable para consumo humano en Colombia; Universidad Nacional de Colombia. Bogotá 2014

Mac-Quhae C; Descripción de un protocolo estandarizado de toxicidad aguda para cladóceros, Publicado en Monografías.com el 29 de octubre de 2002 . Recuperado del enlace <https://goo.gl/dOQAfi>

10	Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable para consumo humano en Colombia.
0	

---

Mandour Raafat, Drinking water toxicity in health and diseases, unidad de toxicología, Hospital de Emergencias, Universidad de Mansoura, Egipto, 2013.

Mancera P, Obtención de un índice de calidad de agua (ICA) para las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico/Colombia, a través del método Delphi., Universidad internacional de Andalucía – Universidad de Huelva, España, 2016.

Marrugo J & Hernández M; Trihalometanos y arsénico en el agua de consumo en los municipios de Chinúy Corozal de Colombia: evaluación del riesgo a la Salud, Ingeniería y Desarrollo, Vol 34, 2016

Metcalf & Eddy, (1995). Indices de Toxicidad / Ingeniería de aguas residuales (3a ed., Vol., pp.). Mc Graw Hill. Recuperado 10,2014 de <http://www.miliarium.com/prontuario/indices/IndicesToxicidad.htm>

Min. Protección social y Min de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, Resolución 2115 de 2007, Artículo 5 Características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, Cuadro No. 2

Neal, R. 1990. Assessing toxicity of drinking water Contaminants: an overview. American Water Works Association, Jstor. Recuperado 11, 2014, de <http://www.jstor.org/stable/41293048>

OECD, Algal Inhibition Test, Testing Methods and the corresponding OJ, Anexo V, método C3 publicado por CEE. 1992 Recuperado de <https://goo.gl/H5CnFo>. 2016

OECD, Acute Toxicity For Daphnia, Testing Methods and the corresponding OJ, Anexo V, método C2 publicado por CEE. 1992 Recuperado de <https://goo.gl/IXaXb8>. 2016

OMS, Organización mundial de la salud, Informe sobre la salud en el mundo, Reducir riesgos y promover la vida Sana, Capitulo II: Definición y Evaluación de los riesgos para la salud, 2002. Recuperado <http://www.who.int/whr/2002/es/> 2017.

OMS, Organización mundial de la salud, guidelines for drinking water quality, Edición 3, Ginebra, Suiza, 2004.

OMS, Organización Mundial de la Salud. Aluminium in drinking-water. Recuperado en en: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/chemicals/en/aluminium.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/en/aluminium.pdf). marzo del 2014.

Pignata C; Morin S; Scharl A; Traversi D; Schiliró T; Degan R; Bartley P; Tu M; Liu H; Peres F; Coste M; Liu W; Gilli G; Application of European biomonitoring techniques in China: Are they a useful tool?, Ecological Indicators, Elsevier, 2013.

PIOLA LUCAS (2011), Ensayos ecotoxicológicos para la evaluación de plaguicidas en suelos agrícolas de Argentina, Tesis Doctoral, Facultad de ciencias exactas y naturales de la Universidad de Buenos Aires.

PORTAFOLIO, finanzas, Sólo el 60% de los colombianos recibe agua potable, Noticia publicada el 21 de marzo de 2014. Recuperado del archivo de portafolio.co <https://goo.gl/gafvqz>

Puij A, Ecotoxicología, Enciclopedia, términos, Ecotoxicol; recuperado 2017 en el enlace <https://goo.gl/a1Nqfp>

Quintero, 2010. Prediagnóstico toxicológico asociado al recurso agua de la cuenca alta del Río Bogotá. Universidad de la Salle. Recuperado 10, 2014, de <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14129/T41.10%20Q45p.pdf?sequence=1>

RAS (Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico), Ministerio de desarrollo económico, Republica de Colombia, Bogotá, año 2000. [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710\\_ras\\_titulo\\_a\\_.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_a_.pdf)

Richardson; Plewa; Wagner; Schoeny & DeMarini, Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in Drinking water: a review and roadmap for research. ELSERVIER, vol 626 pag. 178-242 año 2007.

Sabino C, El proceso de investigación, Ed. Lumen – Humanitas, Argentina , 1996

Sanchez S & Barahona V, Riesgo tóxico medioambiental de compuestos activos utilizados para desinfección de torres de refrigeración, Departamento de toxicología y farmacología, Facultad de veterinaria, Universidad Complutense de Madrid, 2002.

Silva E; Villarreal M; Cárdenas O; Cristancho C; Murillo C; Salgado M & Nava G, Inspección preliminar de algunas características de Toxicidad en el agua potable domiciliaria, Bogotá y Soacha, Grupo de salud ambiental, INS, Bogotá DC, 2012.

Stojda A., Dojlido J. y Woyciechowska J. Water quality assessment with water quality index, Gospod. Wod. 12, 281-284.,1985.

Torres, M., 2003. Empleo de los ensayos con plantas en el control de contaminantes tóxicos ambientales. Scielo. Recuperado 11, 2014, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1561-30032003000200009&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032003000200009&lng=es&nrm=iso). ISSN 1561-3003

UNISDR, Terminología sobre Reducción de Riesgo de Desastres 2009 para los conceptos de Amenaza, vulnerabilidad y riesgo, Recuperado 2017 <https://goo.gl/4iMGkD>

Van Helmond, C. Breukel, R. ; Physico chemical water quality indices. In: J.J. Ottens, F.A.M. Claessen, P.G. Stoks; J.G. Timmerman and R.C. Ward (Eds) – monitoring, Tailor – made II; Proceedings of an international workshop on information strategies in water management, Nunspeet, The Netherlands, 1997 , pages 475-479

Vargas, A & Molina J; Informe nacional de Calidad de agua para consumo humano, julio de 2007 – diciembre de 2011; Ministerio de Salud y Protección social, Bogotá DC, 2013.

VERMEIRE, T. G., A. A. J. van IERSEL, F. A. A. M. de LEEUW, W. J. G. M. PEIJNENBURG, P. van der POEL, R. D. F. M. TAALMAN y C. TOET. 1992. Inicial assessment of the hazards and risks of new chemicals to man and the environment. Nat. Inst. Publ. Health Env. Prot.: 115 pp

Villanueva C; Kogevinas M; Cordier S; Templeton M; Vermeulen R; Nuckols J; Nieuwenhuijsen M & Levallois P, Assessing Exposure and Health Consequences of Chemicals in Drinking Water: Current State of Knowledge and Research Needs; Environ Health Perspect, Volumen 122, Issue 3, publicado marzo 2014 recuperado de <https://ehp.niehs.nih.gov/1206229/>

# ANEXOS

## A.Anexo: Reportes ensayos Toxicidad Crónica con *S. capricornutum*.

Reporte 1 Ensayos montados el 11.08.15

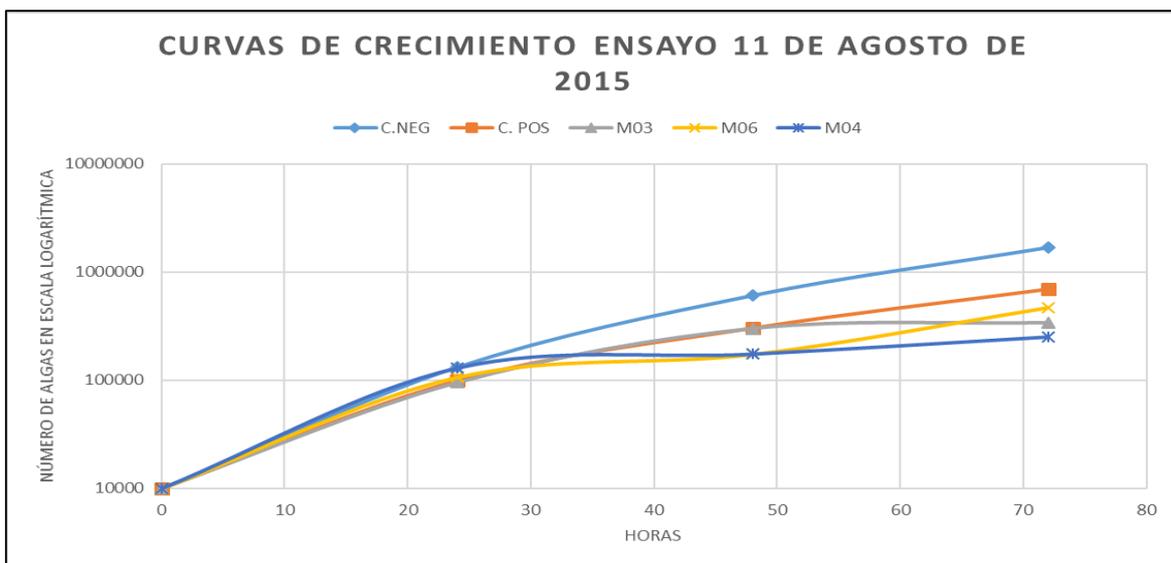
Replica	Hora Lectura			HORA	Conteo Algas c/24hrs			Area Bajo la curva			% Inhibición		
	24	48	64		0	24	48	72	0 - 24	24 - 48		48 - 72	Total 72
CP 1	97500	277500	810000	C.NEG	10000	131666.7	604166.7	1675000.0	1700000	8830000	27350000	37880000	-
CP 2	107500	305000	630000	C. POS	10000	99375.0	304375.0	697500.0	1312500	4845000	12022500	18180000	52%
CP 3	110000	345000	715000	M03	10000	95000.0	300000.0	339166.7	1260000	4740000	7670000	13670000	64%
CP 4	82500	290000	635000	M06	10000	106666.7	173750.0	470833.3	1400000	3365000	7735000	12500000	67%
Desviación	10807.3	25395.3	73186.4	M04	10000	129166.7	173750.0	250000.0	1670000	3635000	5085000	10390000	73%
Promedio	99375.0	304375.0	697500.0										
Coef. Variar	11%	8%	10%										
CN 1	130000	607500	2150000										
CN 2	130000	587500	1400000										
CN 3	135000	617500	1475000										
Desviación	2357.0	12472.2	337268.4										
Promedio	131666.7	604166.7	1675000.0										
Coef. Variar	2%	2%	20%										
M03-1	92500	432500	455000										
M03-2	102500	262500	302500										
M03-3	90000	205000	260000										
Desviación	5400.6	96587.6	83724.1										
Promedio	95000.0	300000.0	339166.7										
Coef. Variar	6%	32%	25%										
M06-1	127500		535000										
M06-2	85000	160000	482500										
M06-3	107500	187500	395000										
Desviación	17360.6	13750.0	57747.1										
Promedio	106666.7	173750.0	470833.3										
Coef. Variar	16%	8%	12%										
M04-1	105000	177500	235000										
M04-2	142500												
M04-3	140000	170000	265000										
Desviación	17118.9	3750.0	15000.0										
Promedio	129166.7	173750.0	250000.0										
Coef. Variar	13%	2%	6%										

Cálculo Tasa de Crecimiento y % de Inhibición de la misma C/24 Hrs						
Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.107	-	0.063	-	0.042	-
C. POS	0.096	11%	0.047	27%	0.035	19%
M03	0.094	13%	0.048	25%	0.005	88%
M06	0.099	8%	0.020	68%	0.042	2%
M04	0.107	1%	0.012	81%	0.015	64%

Cálculo Tasa de Crecimiento y % de Inhibición de la misma desde To hasta Tiempos de Lectura						
Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		0 - 48 hrs		0 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.107	-	0.085	-	0.071	-
C. POS	0.096	11%	0.071	17%	0.059	17%
M03	0.094	13%	0.071	17%	0.049	31%
M06	0.099	8%	0.059	30%	0.053	25%
M04	0.107	1%	0.059	30%	0.045	37%



Reporte 2 Ensayos montados el 02.12.15

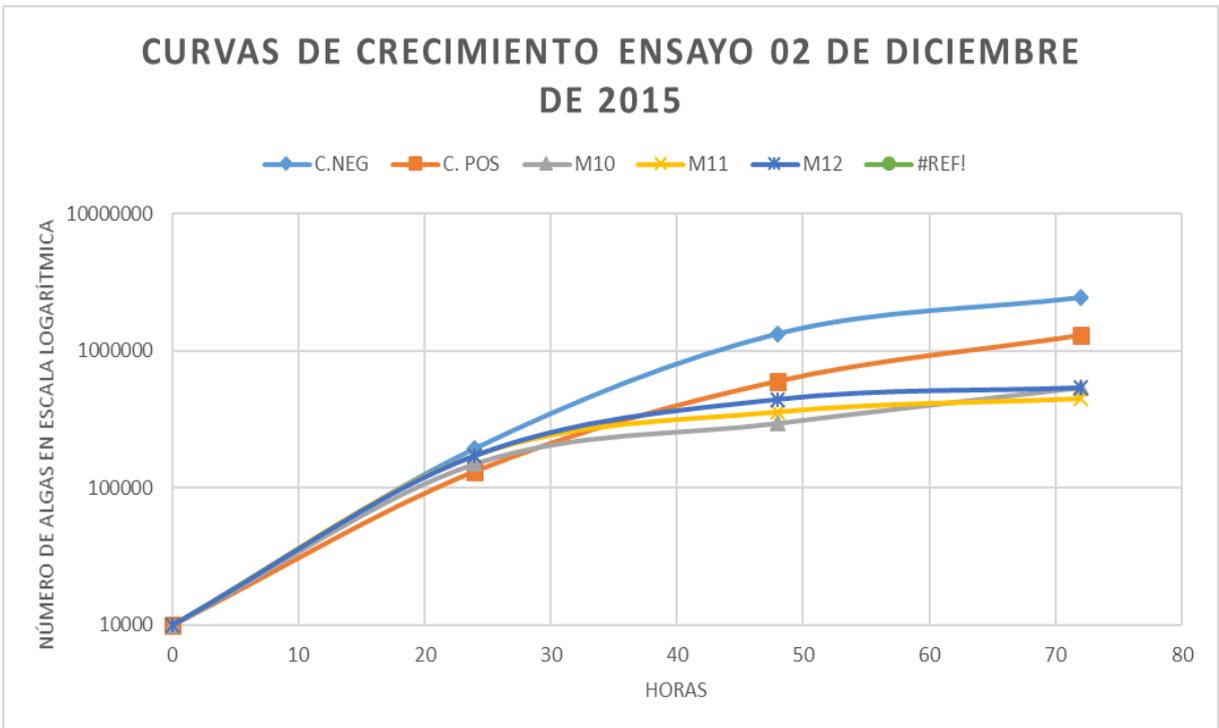
Replica	Hora Lectura			Cálculo de Biomasa a lo largo de todo el ensayo y % de Inhibición de Biomasa Total									
	24	48	72	Listado	Conteo Algas c/24hrs				Area Bajo la curva c/24 hrs y Total				% Inhibición biomasa
Nomenclatura	24	48	72	HORA	0	24	48	72	0 - 24	24 - 48	48 - 72	Total 72	
CN 1	230000	1250000	2725000	C.NEG	10000	195000.0	1335000.0	2445000.0	2460000	18360000	45360000	66180000	-
CN 2	210000	1350000	2375000	C.POS	10000	132500.0	600000.0	1291666.7	1710000	8790000	22700000	33200000	50%
CN 3	187500	1400000	2550000	M10	10000	150833.3	298333.3	543333.3	1930000	5390000	10100000	17420000	74%
CN 4	185000	1325000	2025000	M11	10000	171666.7	355833.3	444166.7	2180000	6330000	9600000	18110000	73%
CN 5	162500	1350000	2550000	M12	10000	172500.0	441666.7	536666.7	2190000	7370000	11740000	21300000	68%
Desviación	23076.0	48989.8	237381.5										
Promedio	195000.0	1335000.0	2445000.0										
Coef. Variar	12%	4%	10%										
CP 1	135000	675000	1275000										
CP 2	137500	500000	1275000										
CP 3	125000	625000	1325000										
Desviación	5400.6	73598.0	23570.2										
Promedio	132500.0	600000.0	1291666.7										
Coef. Variar	4%	12%	2%										
M10-1	157500	297500	537500										
M10-2	130000	290000	542500										
M10-3	165000	307500	550000										
Desviación	15046.2	7168.6	5137.0										
Promedio	150833.3	298333.3	543333.3										
Coef. Variar	10%	2%	1%										
M11-1	180000	350000	435000										
M11-2	150000	362500	460000										
M11-3	185000	355000	437500										
Desviación	15456.0	5137.0	11242.3										
Promedio	171666.7	355833.3	444166.7										
Coef. Variar	9%	1%	3%										
M12-1	160000	422500	532500										
M12-2	182500	457500	545000										
M12-3	175000	445000	532500										
Desviación	9354.1	14481.8	5892.6										
Promedio	172500.0	441666.7	536666.7										
Coef. Variar	5%	3%	1%										

Tiempo Muestra	Cálculo Tasa de Crecimiento y % de Inhibición de la misma C/24 Hrs					
	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.124	-	0.080	-	0.025	-
C.POS	0.108	13%	0.063	21%	0.032	53%
M10	0.113	9%	0.028	65%	0.025	63%
M11	0.118	4%	0.030	62%	0.009	86%
M12	0.119	4%	0.039	51%	0.008	88%

Tiempo Muestra	Cálculo Tasa de Crecimiento y % de Inhibición de la misma desde To hasta Tiempos de Lectura					
	0 - 24 hrs		0 - 48 hrs		0 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.124	-	0.102	-	0.08	-
C.POS	0.108	13%	0.085	16%	0.07	12%
M10	0.113	9%	0.071	31%	0.06	27%
M11	0.118	4%	0.074	27%	0.05	31%
M12	0.119	4%	0.079	23%	0.06	28%



Reporte 3 Ensayos montados el 17.11.15

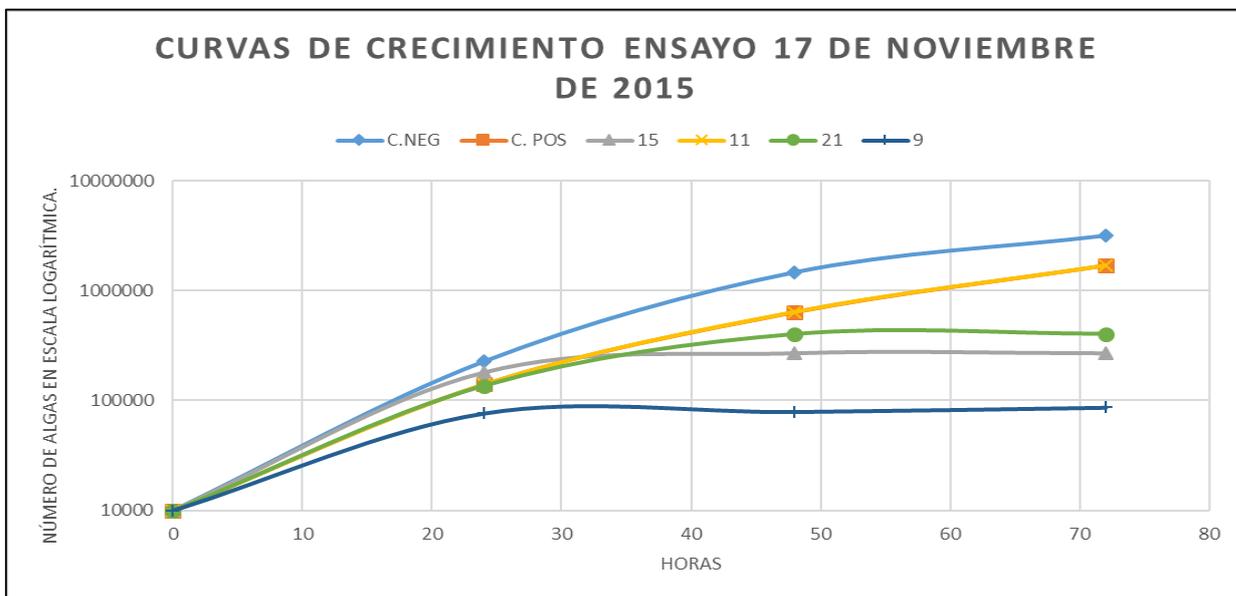
Replica	Hora Lectura			HORA	Conteo Algas c/24hrs			Area Bajo la curva				% Inhibición	
	24	48	64		0	24	48	72	0 - 24	24 - 48	48 - 72		Total 72
CN 1	180000	1600000	3425000	C.NEG	10000	228500.0	1485000.0	3205000.0	2862000	20562000	56280000	79704000	-
CN 2	210000	1475000	3275000	C.POS	10000	140833.3	641666.7	1708333.3	1810000	9390000	28200000	39400000	51%
CN 3	195000	1550000	2425000	15	10000	180000.0	269166.7	269166.7	2280000	5390000	6460000	14130000	82%
CN 4	255000	1275000	3525000	11	10000	140000.0	641666.7	1691666.7	1800000	9380000	28000000	39180000	51%
CN 5	302500	1525000	3375000	22	10000	231666.7	548333.3	565000.0	2900000	9360000	13360000	25620000	68%
Desviación	44710.2	112472.2	398246.2	21	10000	136666.7	402500.0	405000.0	1760000	6470000	9690000	17920000	78%
Promedio	228500.0	1485000.0	3205000.0	9	10000	76666.7	79166.7	86666.7	1040000	1870000	1990000	4900000	94%
Coef. Variar	20%	8%	12%										
CP 1	135000	750000	1875000										
CP 2	137500	675000	1475000										
CP 3	150000	500000	1775000										
Desviación	6561.7	104748.4	169967.3										
Promedio	140833.3	641666.7	1708333.3										
Coef. Variar	5%	16%	10%										
M13-1	200000	297500	277500										
M13-2	175000	247500	265000										
M13-3	165000	262500	265000										
Desviación	14719.6	20949.7	5892.6										
Promedio	180000.0	269166.7	269166.7										
Coef. Variar	8%	8%	2%										
M11-1	147500	550000	1650000										
M11-2	137500	600000	1825000										
M11-3	135000	775000	1600000										
Desviación	5400.6	96465.3	96465.3										
Promedio	140000.0	641666.7	1691666.7										
Coef. Variar	4%	15%	6%										
M17-1	247500	457500	565000										
M17-2	237500	650000	575000										
M17-3	210000	537500	572500										
Desviación	15855.2	78960.3	6123.7										
Promedio	231666.7	548333.3	565000.0										
Coef. Variar	7%	14%	1%										
M16-1	135000	435000	405000										
M16-2	150000	422500	420000										
M16-3	125000	350000	390000										
Desviación	10274.0	37472.2	12247.4										
Promedio	136666.7	402500.0	405000.0										
Coef. Variar	8%	9%	3%										
M09-1	70000	65000	85000										
M09-2	77500	90000	75000										
M09-3	82500	82500	100000										
Desviación	5137.0	10474.8	10274.0										
Promedio	76666.7	79166.7	86666.7										
Coef. Variar	7%	13%	12%										

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.130	-	0.078	-	0.032	-
C.POS	0.110	15%	0.063	19%	0.041	49%
M13	0.120	8%	0.017	79%	0.000	100%
M11	0.110	16%	0.063	19%	0.040	50%
M17	0.131	0%	0.036	54%	0.001	98%
M16	0.109	16%	0.045	42%	0.000	100%
M09	0.085	35%	0.001	98%	0.004	95%

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		0 - 48 hrs		0 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.130	-	0.104	-	0.08	-
C.POS	0.110	15%	0.087	17%	0.07	11%
M13	0.120	8%	0.069	34%	0.05	43%
M11	0.110	16%	0.087	17%	0.07	11%
M17	0.131	0%	0.083	20%	0.06	30%
M16	0.109	16%	0.077	26%	0.05	36%
M09	0.085	35%	0.043	59%	0.03	63%



10 Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el  
 6 índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable  
 para consumo humano en Colombia.

Reporte 4 Ensayos montados el 12.01.16

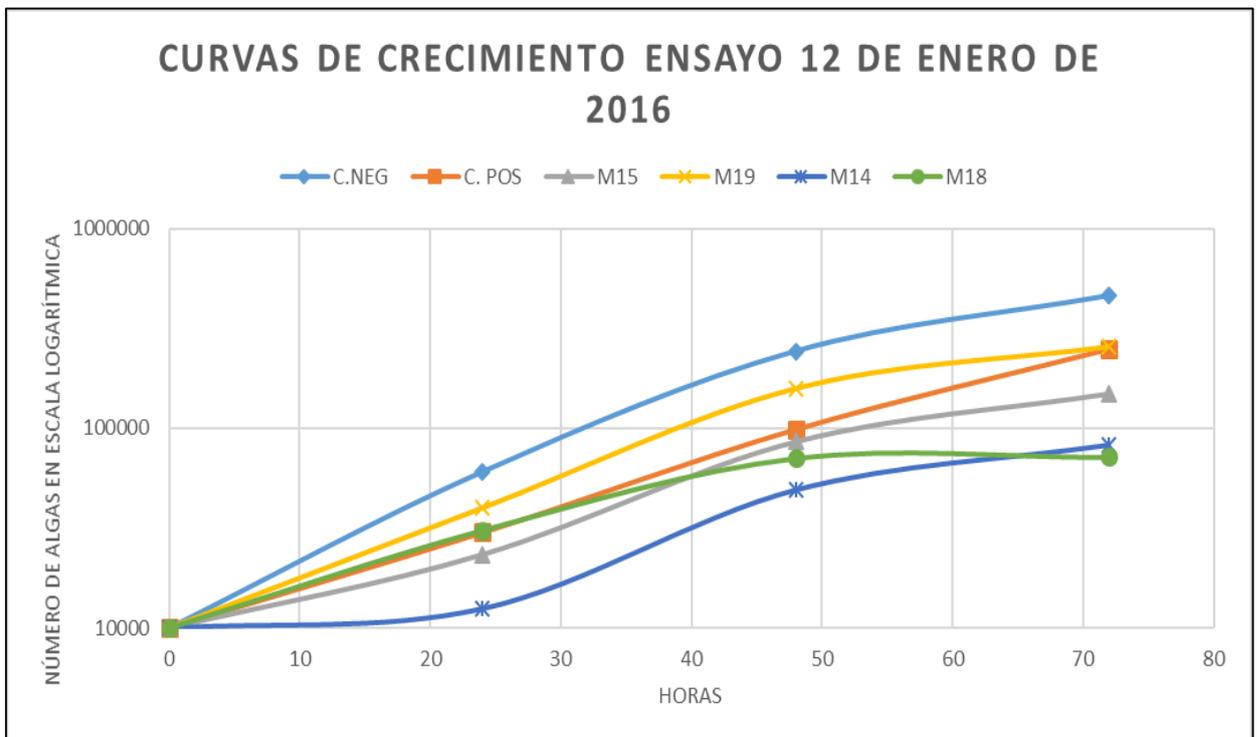
Replica	Hora Lectura			Cálculo de Biomasa a lo largo de todo el ensayo y % de Inhibición de Biomasa Total									
	24	48	72	Listado	Conteo Algas c/24hrs			Area Bajo la curva c/24 hrs y Total				% Inhibición biomasa	
Nomenclatura	0	24	48	72	0 - 24	24 - 48	48 - 72	Total 72					
CN 1	65000	220000	477500	C.NEG	10000	60500.0	242500.0	459000.0	846000	3636000	8418000	12900000	-
CN 2	57500	225000	440000	C.POS	10000	30000.0	98333.3	248333.3	480000	1540000	4160000	6180000	52%
CN 3	60000	240000	470000	M15	10000	23333.3	85833.3	149166.7	400000	1310000	2820000	4530000	65%
CN 4	65000	250000	450000	M19	10000	40000.0	158333.3	256666.7	600000	2380000	4980000	7960000	38%
CN 5	55000	277500	457500	M14	10000	12500.0	49166.7	82500.0	270000	740000	1580000	2590000	80%
Desviación	4000.0	20493.9	13472.2	M18	10000	30833.3	70833.3	71666.7	490000	1220000	1710000	3420000	73%
Promedio	60500.0	242500.0	459000.0										
Coef. Variar	7%	8%	3%										
CP 1	27500	87500	247500										
CP 2	35000	87500	252500										
CP 3	27500	120000	245000										
Desviación	3535.5	15320.6	3118.0										
Promedio	30000.0	98333.3	248333.3										
Coef. Variar	12%	16%	1%										
M15-1	27500	67500	140000										
M15-2	22500	80000	147500										
M15-3	20000	110000	160000										
Desviación	3118.0	17834.1	8249.6										
Promedio	23333.3	85833.3	149166.7										
Coef. Variar	13%	21%	6%										
M19-1	45000	160000	252500										
M19-2	32500	142500	257500										
M19-3	42500	172500	260000										
Desviación	5400.6	12304.0	3118.0										
Promedio	40000.0	158333.3	256666.7										
Coef. Variar	14%	8%	1%										
M14-1	12500	45000	77500										
M14-2	12500	52500	72500										
M14-3	5000	50000	97500										
Desviación	0.0	3118.0	10801.2										
Promedio	12500.0	49166.7	82500.0										
Coef. Variar	0%	6%	13%										
M18-1	32500	75000	72500										
M18-2	30000	70000	70000										
M18-3	30000	67500	72500										
Desviación	1178.5	3118.0	1178.5										
Promedio	30833.3	70833.3	71666.7										
Coef. Variar	4%	4%	2%										

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.075	-	0.058	-	0.027	-
C.POS	0.046	39%	0.049	14%	0.039	13%
M15	0.035	53%	0.054	6%	0.023	48%
M19	0.058	23%	0.057	1%	0.020	55%
M14	0.009	88%	0.057	1%	0.022	52%
M18	0.047	37%	0.035	40%	0.000	99%

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		0 - 48 hrs		0 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.075	-	0.066	-	0.05	-
C.POS	0.046	39%	0.048	28%	0.04	16%
M15	0.035	53%	0.045	33%	0.04	29%
M19	0.058	23%	0.058	13%	0.05	15%
M14	0.009	88%	0.033	50%	0.03	45%
M18	0.047	37%	0.041	39%	0.03	49%



Reporte 5 Ensayos montados el 09.02.16

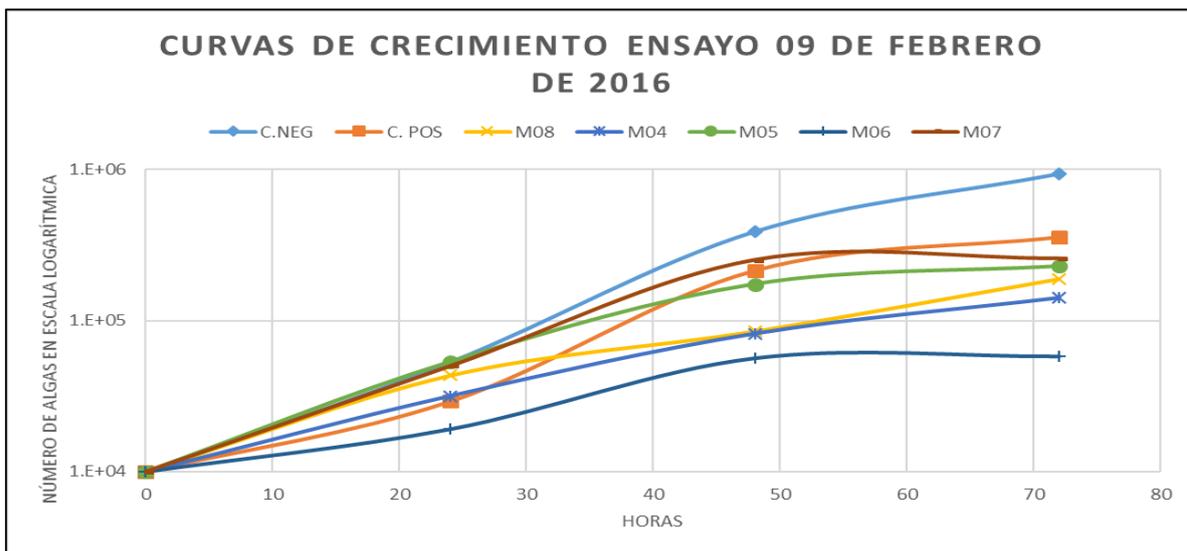
				Cálculo de Biomasa a lo largo de todo el ensayo y % de Inhibición de Biomasa Total									
Replica	Hora Lectura			Listado	Conteo Algas c/24hrs				Area Bajo la curva c/24 hrs y Total				% Inhibición biomasa
	24	48	72		HORA	0	24	48	72	0 - 24	24 - 48	48 - 72	
Nomenclatura	24	48	72	C.NEG	1.E+04	5.E+04	4.E+05	9.E+05	8.E+05	5.E+06	2.E+07	2.E+07	-
CN 1	50000	380000	950000	C.POS	1.E+04	3.E+04	2.E+05	4.E+05	5.E+05	3.E+06	7.E+06	1.E+07	53%
CN 2	55000	397500	875000	M08	1.E+04	4.E+04	9.E+04	2.E+05	6.E+05	2.E+06	3.E+06	5.E+06	75%
CN 3	50000	380000	925000	M04	1.E+04	3.E+04	8.E+04	1.E+05	5.E+05	1.E+06	3.E+06	5.E+06	79%
CN 4	52500	382500	925000	M05	1.E+04	5.E+04	2.E+05	2.E+05	8.E+05	3.E+06	5.E+06	8.E+06	62%
CN 5	57500	397500	1000000	M06	1.E+04	2.E+04	6.E+04	6.E+04	4.E+05	9.E+05	1.E+06	3.E+06	88%
Desviación	2915.5	8215.8	40620.2	M07	1.E+04	5.E+04	3.E+05	3.E+05	7.E+05	4.E+06	6.E+06	1.E+07	52%
Promedio	53000.0	387500.0	935000.0										
Coef. Variar	6%	2%	4%										
CP 1	27500	215000	375000										
CP 2	30000	217500	350000										
CP 3	30000	212500	350000										
Desviación	1178.5	2041.2	11785.1										
Promedio	29166.7	215000.0	358333.3										
Coef. Variar	4%	1%	3%										
M08-1	45000	82500	182500										
M08-2	42500	85000	200000										
M08-3	42500	87500	185000										
Desviación	1178.5	2041.2	7728.0										
Promedio	43333.3	85000.0	189166.7										
Coef. Variar	3%	2%	4%										
M04-1	27500	72500	135000										
M04-2	35000	97500	147500										
M04-3	32500	75000	140000										
Desviación	3118.0	11242.3	5137.0										
Promedio	31666.7	81666.7	140833.3										
Coef. Variar	10%	14%	4%										
M05-1	50000	170000	217500										
M05-2	55000	175000	237500										
M05-3	55000	177500	230000										
Desviación	2357.0	3118.0	8249.6										
Promedio	53333.3	174166.7	228333.3										
Coef. Variar	4%	2%	4%										
M02-1	22500	62500	60000										
M02-2	17500	60000	60000										
M02-3	17500	47500	55000										
Desviación	2357.0	6561.7	2357.0										
Promedio	19166.7	56666.7	58333.3										
Coef. Variar	12%	12%	4%										
M07-1	52500	262500	252500										
M07-2	52500	252500	262500										
M07-3	45000	240000	257500										
Desviación	3535.5	9204.5	4082.5										
Promedio	50000.0	251666.7	257500.0										
Coef. Variar	7%	4%	2%										

Cálculo Tasa de Crecimiento y % de Inhibición de la misma C/24 Hrs						
Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.069	-	0.083	-	0.037	-
C.POS	0.045	36%	0.083	0%	0.021	42%
M08	0.061	12%	0.028	66%	0.033	9%
M04	0.048	31%	0.039	52%	0.023	38%
M05	0.070	0%	0.049	41%	0.011	69%
M06	0.027	61%	0.045	46%	0.001	97%
M07	0.067	3%	0.067	19%	0.001	97%

Cálculo Tasa de Crecimiento y % de Inhibición de la misma desde To hasta Tiempos de Lectura						
Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		0 - 48 hrs		0 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.069	-	0.076	-	0.063	-
C.POS	0.045	36%	0.064	16%	0.050	21%
M08	0.061	12%	0.045	41%	0.041	35%
M04	0.048	31%	0.044	43%	0.037	42%
M05	0.070	0%	0.060	22%	0.043	31%
M06	0.027	61%	0.036	53%	0.024	61%
M07	0.067	3%	0.067	12%	0.045	28%



Reporte 6 Ensayos montados el 17.05.16

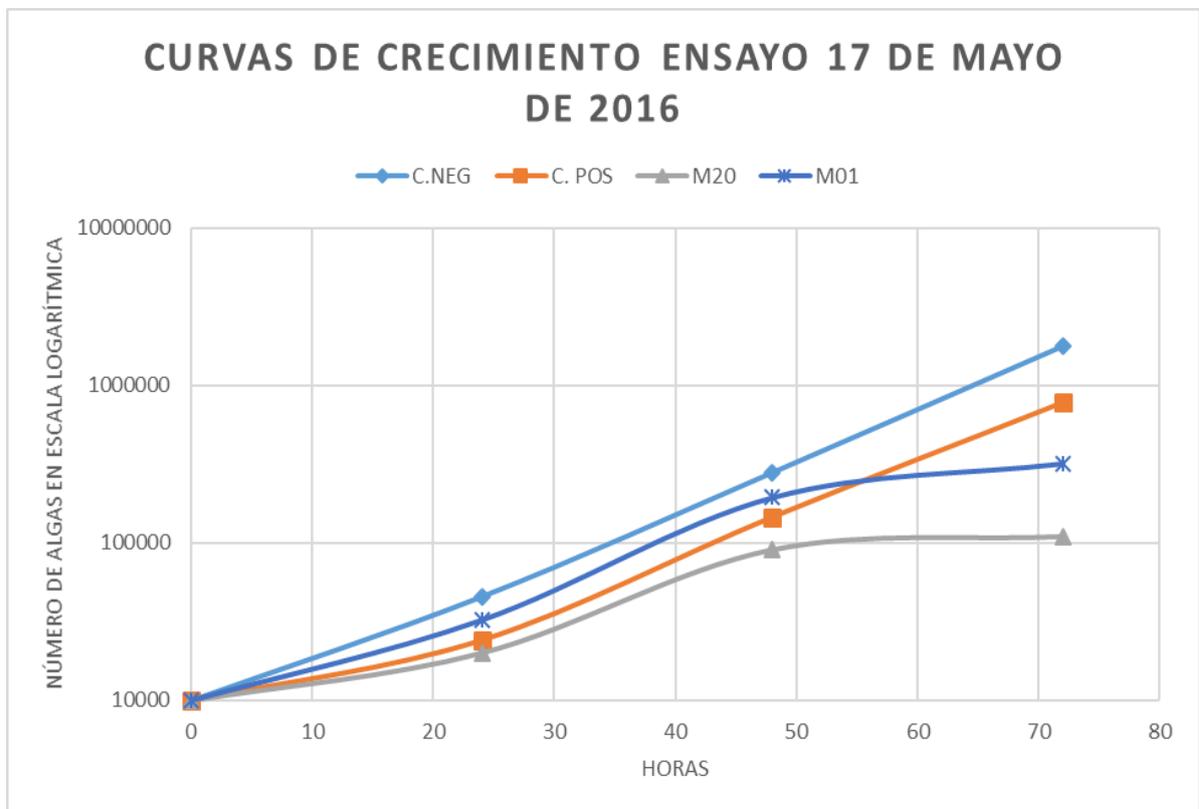
Replica	Hora Lectura			Cálculo de Biomasa a lo largo de todo el ensayo y % de Inhibición de Biomasa Total									
	24	48	72	Listado	Conteo Algas c/24hrs				Area Bajo la curva c/24 hrs y Total				% Inhibición biomasa
Nomenclatura	24	48	72	HORA	0	24	48	72	0 - 24	24 - 48	48 - 72	Total 72	
CN 1	50000	285000	1775000	C.NEG	10000	45500.0	278500.0	1760000.0	666000	3888000	24462000	29016000	-
CN 2	45000	272500	1725000	C.POS	10000	24166.7	145833.3	775000.0	410000	2040000	11050000	13500000	53%
CN 3	35000	292500	1975000	M20	10000	20000.0	90000.0	109166.7	360000	1320000	2390000	4070000	86%
CN 4	45000	287500	1650000	M01	10000	32500.0	195000	320000	510000	2730000	6180000	9420000	68%
CN 5	52500	255000	1675000										
Desviación	6000.0	13472.2	115758.4										
Promedio	45500.0	278500.0	1760000.0										
Coef. Variar	13%	5%	7%										
CP 1	25000	142500	800000										
CP 2	25000	147500	750000										
CP 3	22500	147500	775000										
Desviación	1178.5	2357.0	20412.4										
Promedio	24166.7	145833.3	775000.0										
Coef. Variar	5%	2%	3%										
M20-1	20000	85000	115000										
M20-2	20000	90000	110000										
M20-3	20000	95000	102500										
Desviación	0.0	4082.5	5137.0										
Promedio	20000.0	90000.0	109166.7										
Coef. Variar	0%	5%	5%										
M01-1	37500	212500	325000										
M01-2	32500	195000	320000										
M01-3	35000	190000	320000										
Desviación	2041.2	9646.5	2357.0										
Promedio	35000.0	199166.7	321666.7										
Coef. Variar	6%	5%	1%										

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.063	-	0.075	-	0.077	-
C.POS	0.037	42%	0.075	1%	0.070	9%
M20	0.029	54%	0.063	17%	0.008	90%
M01	0.049	22%	0.075	1%	0.021	73%

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		0 - 48 hrs		0 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C.NEG	0.063	-	0.069	-	0.072	-
C.POS	0.037	42%	0.056	26%	0.060	21%
M20	0.029	54%	0.046	39%	0.033	57%
M01	0.049	22%	0.062	18%	0.048	37%



Reporte 7 Ensayos montados el 17.04.17

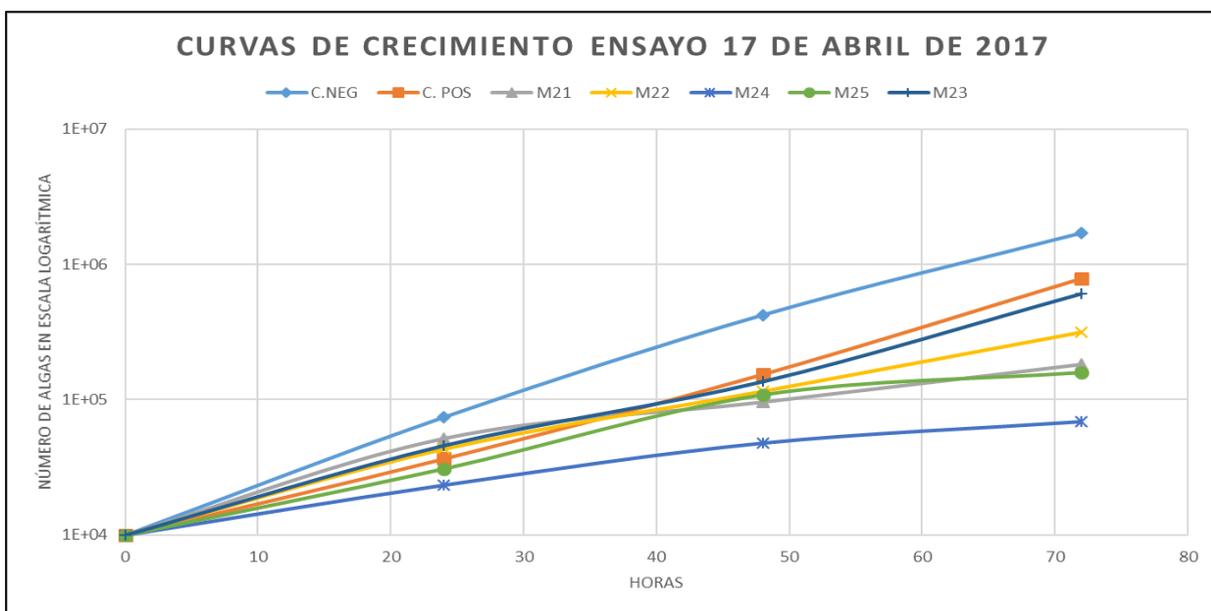
Replica	Hora Lectura			Cálculo de Biomasa a lo largo de todo el ensayo y % de Inhibición de Biomasa Total									
	24	48	72	Listado	Cuento Algas c/24hrs				Area Bajo la curva c/24 hrs y Total				% Inhibición biomasa
Nomenclatura	0	24	48	72	0 - 24	24 - 48	48 - 72	Total 72					
CN 1	70000	427500	1525000		1E+04	7E+04	4E+05	2E+06	1E+06	6E+06	3E+07	3E+07	-
CN 2	77500	445000	1950000		1E+04	4E+04	2E+05	8E+05	6E+05	2E+06	1E+07	1E+07	56%
CN 3	67500	402500	1587500										
CN 4	82500	415000	1750000										
Desviación	5962.1	15712.3	164500.9										
Promedio	74375.0	422500.0	1703125.0										
Coef. Variar	8%	4%	10%										
CP 1	35000	140000	810000										
CP 2	40000	165000	770000										
CP 3	35000	157500	787500										
Desviación	2357.0	10474.8	16372.4										
Promedio	36666.7	154166.7	789166.7										
Coef. Variar	6%	7%	2%										
M21-1	50000	95000	192500										
M21-2	50000	82500	155000										
M21-3	50000	110000	197500										
Desviación	2357.0	11242.3	18966.3										
Promedio	51666.7	95833.3	181666.7										
Coef. Variar	5%	12%	10%										
M22-1	50000	112500	300000										
M22-2	37500	112500	325000										
M22-3	42500	122500	325000										
Desviación	5137.0	4714.0	11785.1										
Promedio	43333.3	115833.3	316666.7										
Coef. Variar	12%	4%	4%										
M24-1	25000	47500	65000										
M24-2	17500	42500	75000										
M24-3	27500	52500	65000										
Desviación	4249.2	4082.5	4714.0										
Promedio	23333.3	47500.0	68333.3										
Coef. Variar	18%	9%	7%										
M25-1	30000	100000	150000										
M25-2	32500	100000	150000										
M25-3	30000	125000	175000										
Desviación	1178.5	11785.1	11785.1										
Promedio	30833.3	108333.3	158333.3										
Coef. Variar	4%	11%	7%										
M23-1	42500	115000	615000										
M23-2	55000	170000	607500										
M23-3	40000	122500	592500										
Desviación	6561.7	24352.7	9354.1										
Promedio	45833.3	135833.3	605000.0										
Coef. Variar	14%	18%	2%										

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C. NEG	0.084	-	0.072	-	0.058	-
C. POS	0.054	24%	0.060	16%	0.068	5%
M21	0.068	4%	0.026	64%	0.027	63%
M22	0.061	14%	0.041	43%	0.042	41%
M24	0.035	51%	0.030	58%	0.015	79%
M25	0.047	34%	0.052	27%	0.016	78%
M23	0.063	11%	0.045	37%	0.062	13%

Tiempo Muestra	0 - 24 hrs		24 - 48 hrs		48 - 72 hrs	
	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento	tasa crecimiento	% Inh. T. Crecimiento
C. NEG	0.084	-	0.078	-	0.07	-
C. POS	0.054	24%	0.057	20%	0.06	15%
M21	0.068	4%	0.047	34%	0.04	44%
M22	0.061	14%	0.051	28%	0.05	33%
M24	0.035	51%	0.032	55%	0.03	63%
M25	0.047	34%	0.050	30%	0.04	46%
M23	0.063	11%	0.054	24%	0.06	20%



Reporte 8 características al inicio y fin del ensayo con *S. capricornutum*

<b>Muestra</b>	<b>pH inicial</b>	<b>pH final</b>	<b>Temperatura medicion pH inicial °C</b>	<b>Temperatura final °C</b>	<b>% Inhibición Biomasa</b>	<b>Toxicidad Positiva</b>
<b>M01</b>	7.10	7.86	20.10	21.80	68%	SI
<b>M02</b>	7.30	7.92	21.80	22.60	88%	SI
<b>M03</b>	7.47	7.30	16.30	22.50	64%	SI
<b>M04</b>	7.17	6.77	16.30	22.10	73%	SI
<b>M05</b>	7.10	7.95	19.70	21.80	62%	SI
<b>M06</b>	6.90	7.27	16.10	22.10	67%	SI
<b>M07</b>	8.10	8.27	20.30	22.40	52%	SI
<b>M08</b>	7.80	8.40	20.30	21.70	75%	SI
<b>M09</b>	7.70	6.84	17.50	22.80	94%	SI
<b>M10</b>	7.43	7.94	19.40	20.00	74%	SI
<b>M11</b>	7.64	7.63	16.50	22.80	51%	SI
<b>M12</b>	6.91	7.37	20.20	20.10	68%	SI
<b>M13</b>	8.23	7.95	12.50	22.60	82%	SI
<b>M14</b>	7.42	7.90	18.30	20.60	80%	SI
<b>M15</b>	7.32	7.69	18.30	20.70	65%	SI
<b>M16</b>	8.06	7.90	17.70	22.20	78%	SI
<b>M17</b>	8.35	8.08	16.60	22.90	68%	SI
<b>M18</b>	6.99	7.36	18.70	20.50	73%	SI
<b>M19</b>	7.94	8.28	18.50	21.00	38%	SI
<b>M20</b>	7.15	8.01	20.10	22.80	86%	SI
<b>M21</b>	7.53	8.10	15.80	22.00	82%	SI
<b>M22</b>	7.98	8.14	15.10	21.90	76%	SI
<b>M23</b>	7.49	7.54	15.30	22.00	64%	SI
<b>M24</b>	6.44	7.29	15.60	22.00	92%	SI
<b>M25</b>	7.78	8.11	18.40	22.10	83%	SI

## B. Anexo: Reportes Ensayos con *Daphnia magna*.

Reporte 9 Condiciones iniciales y finales de los ensayos de mortalidad con *D. magna*

MUESTRA	Temperatura a toma inicial pH	temperatura final	pH inicial	pH final	Oxigeno disuelto final	Oxigeno Disuelto final
M01	20.1	21.3	7.1	7.43	8.37	6.85
M02	21.5	22.3	7.52	7.83	6.78	6.2
M03	18.2	20.1	7.47	7.94	6.39	6.29
M04	18.3	20.4	7.17	7.63	7.89	7.65
M05	18.7	20.1	6.94	7.03	8.03	7.63
M06	18.7	20.1	6.9	7.12	7.84	7.41
M07	20.9	22.3	7.48	7.9	7.28	6.83
M08	20.7	22.3	7.72	8.38	7.16	6.84
M09	18.2	19.3	7.7	7.86	7.1	6.7
M10	16.7	20.3	7.79	8.09	6.59	5.83
M11	18.1	19.7	7.71	7.83	7.64	7.24
M12	16.6	20.2	8.12	8.75	8.64	8.39
M13	17.4	18.9	7.98	7.94	8.9	8.17
M14	17.3	21.2	7.54	8.2	7.95	6.12
M15	17.5	21.2	7.31	7.79	8.97	7.01
M16	17.5	19.5	8.06	7.84	7.34	6.08
M17	18.2	18.9	7.82	8	7.51	6.33
M18	18.3	19	7.21	7.88	8.96	7.16
M19	17.4	21.3	7.5	8.31	6.95	5.46
M20	17.4	21.2	6.93	7.49	7.06	6.28
M21	18.9	22.6	7.63	8.34	7.76	6.49
M22	18.8	22.9	7.79	8.3	7.8	6.36
M23	15.4	21.1	6.84	7.32	7.91	6.3
M24	18.9	19.1	6.54	7.35	7.22	6.35
M25	18.7	19.3	7.41	7.39	7.62	6.27

- 11 Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el  
 2 índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable  
 para consumo humano en Colombia.
- 

Reporte 10 Lecturas ensayo de mortalidad con *D. magna* a las 48 hrs

MUESTRA	Control-	Control +	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	MORTALIDAD D 48 HORAS	TOXICIDAD
M01	0	12	0	0	0	0	NO
M02	0	14	0	0	0	0	NO
M03	0	12	0	0	2	2	NO
M04	0	12	0	0	0	0	NO
M05	0	12	1	0	0	1	NO
M06	0	12	0	0	1	1	NO
M07	0	14	1	1	0	2	NO
M08	0	14	0	0	0	0	NO
M09	0	12	0	0	0	0	NO
M10	0	12	0	0	0	0	NO
M11	2	13	0	0	0	0	NO
M12	0	12	0	0	0	0	NO
M13	0	12	0	0	0	0	NO
M14	1	12	0	2	1	3	SI
M15	1	12	4	5	0	9	SI
M16	0	12	2	1	0	3	SI
M17	0	12	6	3	3	12	SI
M18	0	12	0	0	0	0	NO
M19	1	12	1	2	4	7	SI
M20	1	12	6	2	6	14	SI
M21	1	12	0	0	0	0	NO
M22	1	12	0	0	0	0	NO
M23	1	12	0	1	1	2	NO
M24	1	12	7	7	7	21	SI
M25	1	12	3	0	1	4	SI

## C.Anexo: Evaluación de riesgo con el actual puntaje del IRCA.

Reporte 11 Reporte evaluación IRCA.

EVALUACIÓN IRCA ACTUAL																						
Lísta de muestras	Turbiedad	color verdadero	pH	Alcalinidad Total	Calcio	Magnesio	Hierro	Manganeso	Nitritos	Nitros	Cloruros	Sulfatos	Cloro Residual Libre	Aluminio	Dureza Total	Coliformes Totales	E. coli	Fostatos	IRCA BÁSICO	Evaluación Riesgo IRCA basico	IRCA TOTAL	Evaluación Riesgo IRCA total
M01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M07	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	15	0	0	39%	ALTO	33%	MEDIO
M10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M13																15	0		38%	ALTO	38%	ALTO
M14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	19%	MEDIO	18%	MEDIO
M17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	1%	SIN RIESGO
M18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	19%	MEDIO	16%	MEDIO
M19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO
M23	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	15	0	0	41%	ALTO	34%	MEDIO
M24	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	15	0	0	41%	ALTO	34%	MEDIO
M25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	SIN RIESGO	0%	SIN RIESGO



## D.Anexo: Modelos probabilísticos para corroborar la dependencia de la Toxicidad ante otros Parámetros medidos.

Reporte 12 Matriz de correlación de parámetros analizados.

Parámetro	turbiedad	color	ph	alcalinidad	calcio	magnesio	nitratos	cloruros	sulfatos	crl	dureza	coliformes	Mortalidad Dm	Inhibición Sc
turbiedad	1.00	-0.01	-0.16	-0.21	-0.08	-0.01	0.19	-0.06	-0.06	-0.10	-0.08	0.66	0.05	0.14
color	-0.01	1.00	-0.31	-0.34	-0.22	-0.29	-0.24	-0.38	-0.29	-0.24	-0.27	-0.15	0.08	0.21
ph	-0.16	-0.31	1.00	0.67	0.80	0.16	0.13	0.62	0.65	0.40	0.77	0.12	-0.09	-0.15
alcalinidad	-0.21	-0.34	0.67	1.00	0.82	0.55	-0.06	0.84	0.79	0.58	0.89	-0.08	0.26	-0.17
calcio	-0.08	-0.22	0.80	0.82	1.00	0.22	-0.25	0.76	0.79	0.49	0.97	0.12	0.19	-0.26
magnesio	-0.01	-0.29	0.16	0.55	0.22	1.00	0.18	0.41	0.57	0.57	0.46	0.00	-0.15	0.17
nitratos	0.19	-0.24	0.13	-0.06	-0.25	0.18	1.00	-0.06	-0.05	-0.37	-0.18	0.15	-0.30	0.20
cloruros	-0.06	-0.38	0.62	0.84	0.76	0.41	-0.06	1.00	0.85	0.60	0.80	0.09	0.31	-0.22
sulfatos	-0.06	-0.29	0.65	0.79	0.79	0.57	-0.05	0.85	1.00	0.61	0.86	0.16	0.09	-0.24
crl	-0.10	-0.24	0.40	0.58	0.49	0.57	-0.37	0.60	0.61	1.00	0.59	-0.04	-0.06	-0.08
dureza	-0.08	-0.27	0.77	0.89	0.97	0.46	-0.18	0.80	0.86	0.59	1.00	0.11	0.14	-0.19
coliformes	0.66	-0.15	0.12	-0.08	0.12	0.00	0.15	0.09	0.16	-0.04	0.11	1.00	-0.04	0.05
Mortalidad Dm	0.05	0.08	-0.09	0.26	0.19	-0.15	-0.30	0.31	0.09	-0.06	0.14	-0.04	1.00	0.17
Inhibición Sc	0.14	0.21	-0.15	-0.17	-0.26	0.17	0.20	-0.22	-0.24	-0.08	-0.19	0.05	0.17	1.00

Reporte 13 Salidas en R del modelo de regresión aplicado a la toxicidad según resultados de mortalidad con *D. magna*

<pre>Rcmdr&gt; summary(Mod_Dm)  Call: lm(formula = Mortalidad.Dm ~ alcalinidad + calcio + cloruros +   coliformes + color + crl + dureza + magnesio + nitratos +   ph + sulfatos + turbiedad, data = IRCA_PAR)  Residuals:     Min     1Q   Median     3Q      Max -7.2738 -2.0426 -0.5324  2.1546 10.8967  Coefficients: (1 not defined because of singularities)               Estimate Std. Error t value Pr(&gt; t ) (Intercept)  15.887293  29.015967   0.548  0.594 alcalinidad   0.144063   0.130398   1.105  0.291 calcio        0.016002   0.132246   0.121  0.906 cloruros      0.218813   0.183847   1.190  0.257 coliformes   -0.003587   0.039408  -0.091  0.929 color         0.227847   0.550847   0.414  0.686 crl          -5.886327   4.487396  -1.312  0.214 dureza       -0.055659   0.135559  -0.411  0.689 magnesio           NA           NA       NA     NA nitratos     -30.004379  24.525588  -1.223  0.245 ph           -1.300549   4.787870  -0.272  0.791 sulfatos     -0.017210   0.060634  -0.284  0.781 turbiedad     3.374527   4.202238   0.803  0.438  Residual standard error: 5.01 on 12 degrees of freedom Multiple R-squared:  0.5607, Adjusted R-squared:  0.1579 F-statistic: 1.392 on 11 and 12 DF, p-value: 0.2887</pre>	<pre>Rcmdr&gt; summary(Mod2_Dm)  Call: lm(formula = Mortalidad.Dm ~ alcalinidad + cloruros + nitratos,   data = IRCA_PAR)  Residuals:     Min     1Q   Median     3Q      Max -4.737  -2.894  -1.016   1.017  18.562  Coefficients:               Estimate Std. Error t value Pr(&gt; t ) (Intercept)   3.981138  2.773118   1.436  0.167 alcalinidad  -0.007901  0.068619  -0.115  0.909 cloruros      0.104035  0.118021   0.881  0.389 nitratos     -16.409386  11.910457  -1.378  0.184  Residual standard error: 5.31 on 20 degrees of freedom Multiple R-squared:  0.1774, Adjusted R-squared:  0.05404 F-statistic: 1.438 on 3 and 20 DF, p-value: 0.2614</pre> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>Mod_Dm</u>: Modelo de regresión lineal para explicar el ensayo de toxicidad con <i>D. magna</i> a partir de todos los parámetros analizados.</li> <li>2. <u>Mod2_Dm</u>: Modelo de regresión lineal para explicar el ensayo de toxicidad con <i>D. magna</i> a partir de los parámetros analizados con mayor correlación con el ensayo toxicológico.</li> </ol>
---	---

Reporte 14 Salidas en R del modelo de regresión aplicado a la toxicidad según resultados de Inhibición con *S. capricornutum*.

<pre>Rcmdr&gt; summary(Mod_Dm)  Call: lm(formula = Mortalidad.Dm ~ alcalinidad + calcio + cloruros +   coliformes + color + crl + dureza + magnesio + nitratos +   ph + sulfatos + turbiedad, data = IRCA_PAR)  Residuals:     Min     1Q   Median     3Q      Max -7.2738 -2.0426 -0.5324  2.1546 10.8967  Coefficients: (1 not defined because of singularities)               Estimate Std. Error t value Pr(&gt; t ) (Intercept)  15.887293  29.015967   0.548   0.594 alcalinidad   0.144063   0.130398   1.105   0.291 calcio        0.016002   0.132246   0.121   0.906 cloruros      0.218813   0.183847   1.190   0.257 coliformes   -0.003587   0.039408  -0.091   0.929 color         0.227847   0.550847   0.414   0.686 crl          -5.886327   4.487396  -1.312   0.214 dureza       -0.055659   0.135559  -0.411   0.689 magnesio      NA          NA         NA      NA nitratos     -30.004379  24.525588  -1.223   0.245 ph           -1.300549   4.787870  -0.272   0.791 sulfatos     -0.017210   0.060634  -0.284   0.781 turbiedad    3.374527   4.202238   0.803   0.438  Residual standard error: 5.01 on 12 degrees of freedom Multiple R-squared:  0.5607, Adjusted R-squared:  0.1579 F-statistic: 1.392 on 11 and 12 DF, p-value: 0.2887</pre>	<pre>Rcmdr&gt; summary(Mod2_Dm)  Call: lm(formula = Mortalidad.Dm ~ alcalinidad + cloruros + nitratos,   data = IRCA_PAR)  Residuals:     Min     1Q   Median     3Q      Max -4.737 -2.894 -1.016  1.017 18.562  Coefficients:               Estimate Std. Error t value Pr(&gt; t ) (Intercept)   3.981138  2.773118   1.436   0.167 alcalinidad  -0.007901  0.068619  -0.115   0.909 cloruros       0.104035  0.118021   0.881   0.389 nitratos     -16.409386 11.910457  -1.378   0.184  Residual standard error: 5.31 on 20 degrees of freedom Multiple R-squared:  0.1774, Adjusted R-squared:  0.05404 F-statistic: 1.438 on 3 and 20 DF, p-value: 0.2614</pre> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>Mod_Dm</u>: Modelo de regresión lineal para explicar el ensayo de toxicidad con D. magna a partir de todos los parámetros analizados.</li> <li>2. <u>Mod2_Dm</u>: Modelo de regresión lineal para explicar el ensayo de toxicidad con D. magna a partir de los parámetros analizados con mayor correlación con el ensayo toxicológico.</li> </ol>
---	---

- 11 Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el  
 8 índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable  
 para consumo humano en Colombia.

Reporte 15 Resultados Prueba ANOVA (Varianza) para modelos con la totalidad de los parámetros teniendo como variables dependientes la Mortalidad de *D. magna* y la Inhibición de *S. capricornutum*

Prueba ANOVA para el ensayo de toxicidad con <i>D. magna</i> .	Prueba ANOVA para el ensayo de toxicidad con <i>S. capricornutum</i> .
Rcmdr> Anova(Mod_Dm, type="II", vcov=hccm(Mod_Dm, type="hc3")) Analysis of Deviance Table (Type II tests)	Rcmdr> Anova(Mod_Sc, type="II", vcov=hccm(Mod_Sc, type="hc3")) Analysis of Deviance Table (Type II tests)
Response: Mortalidad.Dm	Response: Inhibición.Sc
Df F Pr(>F)	Df F Pr(>F)
alcalinidad 1 0.7477 0.4041	alcalinidad 1 0.2640 0.6167
calcio 1 0.0159 0.9017	calcio 1 1.5758 0.2333
cloruros 1 0.9683 0.3445	cloruros 1 0.2653 0.6159
coliformes 1 0.0035 0.9535	coliformes 1 0.0229 0.8822
color 1 0.0970 0.7608	color 1 0.8556 0.3732
cr1 1 1.5342 0.2392	cr1 1 0.1585 0.6976
dureza 1 0.1003 0.7569	dureza 1 1.3305 0.2712
magnesio 0	magnesio 0
nitratos 1 0.7283 0.4101	nitratos 1 0.0022 0.9632
ph 1 0.0366 0.8514	ph 1 0.3449 0.5679
sulfatos 1 0.0205 0.8885	sulfatos 1 1.1345 0.3078
turbiedad 1 0.2716 0.6117	turbiedad 1 0.0017 0.9677
Residuals 12	Residuals 12

## E. Anexo: Propuesta final de modificación del IRCA con la inclusión de bioensayos.

Reporte 16 Resumen de valores asignados y propuesta seleccionada según método Delphi

Característica	Puntaje de Riesgo Actual	Valores según M. Delphi	Promedio actual ponderación y M. Delphi	Propuesta final de modificación de puntaje de Riesgo (redondear 1 décima)	Propuesta final de modificación de puntaje de Riesgo (redondear Abajo)	Propuesta final de modificación de puntaje de Riesgo (redondear Arriba)
Alcalinidad Total	1	1	1	1	1	1
Aluminio (Al+3)	3	3	3	3	3	3
Calcio	1	1	1	1	1	1
Cloro Residual Libre	15	15	15	15	15	15
Cloruros	1	1	1	1	1	1
Coifomes Totales	15	7.3	11.15	11.2	11	12
Color Aparente	6	3.9	4.95	5	4	5
COT	3	3	3	3	3	3
Dureza Total	1	1	1	1	1	1
Escherichia Coli	25	25	25	25	25	25
Fluoruros	1	1	1	1	1	1
Fosfatos	1	1	1	1	1	1
Hierro Total	1.5	1	1.25	1.3	1	2
Magnesio	1	1	1	1	1	1
Manganeso	1	1	1	1	1	1
Molibdeno	1	1	1	1	1	1
Nitratos	1	1	1	1	1	1
Nitritos	3	3	3	3	3	3
pH	1.5	1.3	1.4	1.4	1	2
Sulfatos	1	1	1	1	1	1
Turbiedad	15	10.2	12.6	12.6	12	13
Zinc	1	1	1	1	1	1
Bioensayo con <i>D. magna</i> (Mortalidad a 48 horas)	No Aplica	5.1	5.1	5.1	5	6
Bioensayo con <i>S. capricornutum</i> (Inhibición de crecimiento a 72 horas)	No Aplica	5.4	5.4	5.4	5	6
Sumatoria de puntajes asignados	100	95.2	102.85	103	100	107

Reporte 17 Tabla de valores evaluados con puntajes de riesgo de la propuesta resultado Delphi

EVALUACION																										
Listado de muestras	Turbiedad	color verdadero	pH	Alcalinidad Total	Calcio	Magnesio	Hierro	Manganeso	Nitritos	Nitratos	Cloruros	Sulfatos	Cloro Residual Libre	Aluminio	Dureza Total	Coliformes Totales	E. coli	Algas	Pulgas	Fostatos	IRCA BÁSICO	IRCA TOTAL	Evaluación Riesgo	Ensayo D. magna	Ensayo S. capricornutum	
M01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	0	0	20%	17%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0%	5.4%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	0	0	16%	16.8%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0%	5.4%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0%	5.4%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0%	5.4%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M07	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	0	0	0	16%	18%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0%	5.4%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	11	0	5	0	0	37%	33.7%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	0	0	16%	17.4%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	0	0	16%	17.4%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	0	0	16%	17.4%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	0	0	29%	34.8%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	5	0	16%	23.9%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	5	0	16%	23.9%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	5	5	0	16%	23.9%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0%	12.0%	BAJO	ECOTONICA	ECOTONICA	
M18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	5	0	0	21%	21.7%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0%	10.5%	BAJO	NO ECOTONICA	NO ECOTONICA	
M20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0%	10.9%	BAJO	ECOTONICA	ECOTONICA	
M21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0%	5.3%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0%	5.4%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M23	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	11	0	5	0	0	38%	33.7%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA
M24	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	11	0	5	5	0	38%	38.9%	ALTO	ECOTONICA	ECOTONICA
M25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0%	10.9%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	

Reporte 18 Tabla de valores evaluados con puntajes de riesgo del ejercicio individual para responder la encuesta del método Delphi.

EVALUACION																										
Listado de muestras	Turbiedad	color verdadero	pH	Alcalinidad Total	Calcio	Magnesio	Hierro	Manganeso	Nitritos	Nitratos	Cloruros	Sulfatos	Cloro Residual Libre	Aluminio	Dureza Total	Coliformes Totales	E. coli	Algas	Pulgas	Fostatos	IRCA BÁSICO	IRCA TOTAL	Evaluación Riesgo	Ensayo D. magna	Ensayo S. capricornutum	
M01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	23%	21.1%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0%	8.6%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	18%	21.1%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0%	8.6%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0%	8.6%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0%	8.6%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M07	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	18%	22.6%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0%	8.6%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	12	0	8	0	0	40%	37.6%	ALTO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	18%	21.5%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	18%	21.5%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	18%	21.5%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	0	0	32%	40.0%	ALTO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	5	0	18%	28.0%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	5	0	18%	28.0%	MEDIO	ECOTONICA	ECOTONICA	
M16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	8	5	0	18%	28.0%	MEDIO	ECOTONICA	ECOTONICA	
M17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	0	0%	15.1%	MEDIO	ECOTONICA	ECOTONICA	
M18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	8	0	0	22%	24.7%	MEDIO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	0	0%	13.7%	BAJO	ECOTONICA	ECOTONICA	
M20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	0	0%	14.0%	BAJO	ECOTONICA	ECOTONICA	
M21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0%	8.4%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0%	8.6%	BAJO	NO ECOTONICA	ECOTONICA	
M23	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	12	0	8	0	0	42%	38.4%	ALTO	NO ECOTONICA	ECOTONICA
M24	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	12	0	8	5	0	42%	43.7%	ALTO	ECOTONICA	ECOTONICA
M25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	0	0%	14.0%	BAJO	ECOTONICA	ECOTONICA	

---

Reporte 19 Modelo de la encuesta usada para realizar el método Delphi.

Estimado Dr (a), Cordial Saludo,

En el cálculo del IRCA (índice de riesgo de calidad de agua para consumo humano), reglamentado mediante la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social y Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial, se establece la evaluación de 20 parámetros fisicoquímicos y 2 microbiológicos (capítulo 4 artículo 13), incluyendo un puntaje de riesgo por el no cumplimiento del valor establecido en la resolución a cada uno de ellos para una valoración total de 100 puntos, sin embargo, la Resolución establece en el parágrafo del artículo 14 las características mínimas que se deben evaluar por el prestador del servicio y por las autoridades sanitarias, dependiendo del número de usuarios, lo que no obliga a evaluar los 22 parámetros y considera como mínimo de 6 de ellos (Turbiedad, Cloro residual libre, Color verdadero, *E. coli* y Coliformes totales).

Actualmente en la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, dentro de una tesis de maestría se adelanta una investigación dirigida por la Dra. Martha C. Bustos López, la cual tiene como objetivo evaluar la potencial inclusión del parámetro de toxicidad dentro del IRCA, debido a que no siempre se evalúan todos los 22 parámetros, por motivos económicos o técnicos, y la presencia de sustancias químicas no evaluadas puede tener efectos adversos a la salud que no se están evidenciando y que un bioensayo si lo mostraría.

Para ello se propone modificar los puntajes de riesgo asignados a cada característica con el fin de darle un puntaje de riesgo a la evaluación de toxicidad mediante el uso de 2 Bioensayos (uno en organismo vegetal y otro en organismo animal) dentro del IRCA, mediante la metodología DELPHI.

Teniendo en cuenta su experiencia y amplio conocimiento en el tema, lo invitamos a participar en el panel de expertos para seleccionar cuales características de las que actualmente se consideran dentro del IRCA se podrían modificar y cuál sería el nuevo puntaje de riesgo para estas y los ensayos de toxicidad, diligenciando el archivo adjunto.

De antemano agradecemos por su valiosa participación en este ejercicio académico, y la información que nos proporcionen será manejada de manera confidencial.

Cordialmente,

Laura Daniela Macías Rodríguez  
IC, cMSc. en Ingeniería – Recursos Hidráulicos.

12 Propuesta para evaluar la potencial inclusión del parámetro toxicidad en el  
2 índice IRCA, y su efecto sobre la evaluación de la calidad de agua potable  
para consumo humano en Colombia.

---

### Metodología Delphi aplicada a la reformulación IRCA

Fecha:

Nombre:

Institución:

Cargo:

---

Parámetros actualmente evaluados para calcular el IRCA con sus respectivos puntajes de riesgo por incumplimiento de los valores admisibles en la Resolución 2115 de 2007, y 2 bioensayos para evaluación de la toxicidad que se propone incluir.

Nota: en los anexos se incluye la información preliminar de la evaluación de 25 muestras de agua para consumo humano tomadas en la región del altiplano cundiboyacense y base del estudio previamente mencionado.

<b>Característica</b>	<b>Puntaje de Riesgo Actual</b>	<b>Marque con una x los parámetros que modificaría</b>	<b>¿Qué puntaje de riesgo asignaría desde su experiencia y conocimiento?</b>	<b>Justificación</b>
Color Aparente	6			
Turbiedad	15			
pH	1,5			
Cloro Residual Libre	15			
Alcalinidad Total	1			
Calcio	1			
Fosfatos	1			
Manganeso	1			
Molibdeno	1			
Magnesio	1			

<b>Característica</b>	<b>Puntaje de Riesgo Actual</b>	<b>Marque con una x los parámetros que modificaría</b>	<b>¿Qué puntaje de riesgo asignaría desde su experiencia y conocimiento?</b>	<b>Justificación</b>
Zinc	1			
Dureza Total	1			
Sulfatos	1			
Hierro Total	1,5			
Cloruros	1			
Nitratos	1			
Nitritos	3			
Aluminio (Al+3)	3			
Fluoruros	1			
COT	3			
Coliformes Totales	15			
<i>Escherichia Coli</i>	25			
Bioensayo con <i>D. magna</i> (Mortalidad a 48 horas)	No Aplica			
Bioensayo con <i>S. capricornutum</i> (Inhibición de crecimiento a 72 horas)	No Aplica			
Sumatoria de puntajes asignados	100			

- Incluiría algún otro parámetro, SI \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_\_ ¿cuál y por qué?

Anexos Encuesta:

Tabla 1: Porcentaje de muestras de agua potable con parámetros que incumplen los valores máximos admisibles de la Resolución 2115 de 2007 para evaluar el IRCA.

<b>Característica</b>	<b>% Muestras que incumplieron</b>
pH	8%
Calcio	33%
CRL	17%
Coliformes Totales	52%

Tabla 2: Resultado del IRCA para establecer el nivel de riesgo, en las 25 muestras analizadas

<b>Nivel de Riesgo</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Porcentaje</b>
ALTO	1	4%
MEDIO	13	52%
BAJO	0	0%
SIN RIESGO	11	44%

Tabla 3: Resumen de los resultados para el ensayo de toxicidad aguda con *D. magna* (48 Horas) para las 25 muestras seleccionadas.

<b>Bioensayo <i>D. magna</i></b>		
<b>Muestras</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Porcentaje</b>
No Ecotóxicas	17	68%
Ecotóxicas	8	32%

Tabla 4: Resumen de los resultados para el ensayo de toxicidad crónica con *S. capricornutum* (72 Horas) para las 25 muestras seleccionadas.

<b>Bioensayo <i>S. capricornutum</i></b>		
<b>Muestras</b>	<b>Número de muestras</b>	<b>Porcentaje</b>
No Ecotóxicas	0	0%
Ecotóxicas	25	100%