

FORMULACIÓN DE UN ÍNDICE GLOBAL DE CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES PARA RIEGO

FORMULATION OF A GLOBAL INDEX OF WASTEWATER QUALITY FOR IRRIGATION

Alba N. Ardila^{1*}, Julio C. Saldarriaga²

(1) Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Facultad de Ciencias Básicas Sociales y Humanas, Grupo de Investigación en Química Básica y Aplicada a Procesos Bioquímicos, Biotecnológicos y Ambientales, Apartado Aéreo 49-32, Medellín - Colombia

(2) Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Apartado Aéreo 1226, Medellín - Colombia

*autor de contacto (e-mail: anardila@elpoli.edu.co; albanellya@gmail.com)

Recibido: 17/12/2012 - Evaluado: 21/02/2013 - Aceptado: 04/04/2013

RESUMEN

Se formuló un Índice Global de Calidad de Aguas Residuales para Riego (IGCAR) como una herramienta para tomar decisiones prácticas y asertivas con el fin de destinar un agua residual como insumo vital para el sector agrícola. El IGCAR se obtuvo aplicando el método de promedio geométrico ponderado, que permitió ponderar las calidades obtenidas para los 34 parámetros de tipo fisicoquímico y microbiológico seleccionados, obteniéndose un resultado numérico entre 0 y 100, representando 100 la mejor calidad deseable para riego y 0 la peor calidad. El valor de 70 para el IGCAR corresponderá a la calidad mínima aceptable para usar un agua destinada a riego. Igualmente, se realizó una asignación de factores de ponderación según la importancia relativa del parámetro en la calidad resultante del agua para riego, los cuales varían entre uno y cuatro de mayor a menor importancia. Los 34 parámetros seleccionados se clasificaron en 17 básicos y en 17 complementarios.

ABSTRACT

A Global Index of Quality of Wastewater to Irrigation (IGCAR) was formulated, as a tool for making practical and assertive decisions in order to the use wastewater as a vital input in the agricultural sector. The quality index was obtained using the average weighted geometric method, which allowed averaging the grades obtained for the 34 parameters physicochemical and microbiological selected, yielding a numerical score between 0 and 100, where 100 represents the best desirable quality for irrigation and zero, the worst. The value of 70 for the IGCAR corresponds to the minimum acceptable quality for a water use for irrigation. Likewise, it made an assignment of weights by the relative importance of the parameter in the resulting quality of irrigation water, which varies between one and four, from highest to lowest importance. The 34 parameters selected were classified into 17 basics and 17 supplementaries.

Palabras clave: índice de calidad de aguas; sector agrícola; riego; parámetros fisicoquímicos del agua
Keywords: water quality index; agricultural sector; irrigation; water physicochemical parameters

INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas las organizaciones nacionales e internacionales vienen advirtiendo con respecto a la problemática de escasez del agua potable y sus graves consecuencias en términos del desarrollo sostenible, puesto que cerca de un 20% de la población mundial no cuenta con acceso a este recurso. Igualmente, algunas cifras de estudios internacionales presentan un panorama alarmante al afirmar que el consumo de agua potable ha aumentado cuatro veces en los últimos 50 años, lo que implica un incremento del 0,017% del total en la extracción de agua de los ríos y lagos. La causa de esta crisis puede ser atribuida a muchos fenómenos, entre los cuales se resaltan: la escasez de precipitación, la contaminación del recurso, el aumento en la demanda, la disminución en la oferta y el sobreuso por parte de los diferentes sectores productivos como el pecuario, urbano, industrial y agrícola; sector que consume la mayoría del agua disponible globalmente en el riego de cultivos. Así, diferentes organismos nacionales e internacionales afirman que el sector agrícola utiliza aproximadamente un 65% del agua total disponible en todo el planeta (Rajankar *et al.*, 2009; Faithful & Finlayson, 2005; Kretschmer *et al.*, 2002). Este fenómeno de la crisis actual en relación con el deterioro y la disponibilidad en cantidad y calidad de agua, ha llevado a que cada día se generen estrategias que permitan hacer un uso racional y un manejo adecuado del recurso en los diferentes sectores productivos. Entre los cuales se ha priorizado el uso de las aguas superficiales especialmente para abastecimiento público de agua para consumo humano, lo cual ha afectado enormemente la actividad agrícola, por lo tanto, recientemente se ha optado por el reúso de las aguas residuales en este tipo de actividades en vez de eliminarlas a los cuerpos de agua superficiales. No obstante, numerosos estudios e investigaciones, han demostrado que el uso excesivo en riego de este tipo de aguas sin que cumplan con unas condiciones mínimas de calidad, se puede convertir en una práctica altamente peligrosa, impactando negativamente al medio ambiente, la calidad de las cosechas y la salud de los productores y consumidores (Almeida *et al.*, 2008; Gatica *et al.*, 2012; Hurley *et al.*, 2012).

El riego con aguas residuales produce varios efectos en el ambiente. Aun cuando muchos de ellos son beneficiosos, otros pueden amenazar la productividad de mas largo plazo, degradar la calidad ambiental y/o aumentar los riegos a la salud pública. Tres aspectos considerados importantes corresponden a las modificaciones que pueden sufrir los suelos, la degradación de la calidad de las aguas y los riesgos a la salud. Los problemas más comunes y quizás más serios respecto a la modificación de suelos corresponden al estancamiento del agua, salinización y alcalinización. Aguas de riego con altos contenidos de sodio significativamente reducen las tasas de infiltración del suelo provocando permanentes inundaciones que pueden extenderse más allá de los límites del predio y por lo tanto generar un daño al ambiente rural. Cuando se utilizan aguas de baja calidad, existe una tendencia a aplicar más agua que la necesaria para los cultivos con el objeto de lavar las sales y iones tóxicos de la zona de raíces. Si esta práctica se adopta sin un adecuado drenaje, existirá un aumento gradual en la napa freática, resultando en la salinización y deterioro eventual de la calidad de las tierras agrícolas. Por otro lado, la alcalinización es otro problema relevante. Esto puede ocurrir debido a aguas subterráneas alcalinas o debido a una alta relación de adsorción de sodio en el agua de riego. El sodio en esta agua comienza a concentrarse en las capas superiores de suelo, en gran exceso comparado con los niveles de Ca y Mg, transformando el suelo en una barrera impermeable al agua. Por otra parte, es necesario tener en cuenta que aun cuando los efectos de la calidad del agua sobre el riego pueden ser serios, más serios pueden ser los efectos de las prácticas agrícolas sobre la calidad de las aguas. En efecto, la agricultura contribuye su cuota en la contaminación de aguas debido a fuentes puntuales y dispersas (Raschid-Sally *et al.*, 2001; OMS, 2006; Ken, 2002; Kretschmer *et al.*, 2002; Qadir & Oster, 2004; Rajankar *et al.*, 2009; Torres *et al.*, 2009; Das., 2009; Srebotnjak *et al.*, 2012; Almeida *et al.*, 2007).

El impacto de residuos agrícolas tales como sedimentos, sales disueltas, bacterias y agroquímicos deben ser también evaluados. El material de erosión de las tierras cultivadas resulta de prácticas agrícolas inadecuadas y puede provocar deterioro del drenaje, disminución de la capacidad útil en reservorios así como un aumento en los requerimientos de dragado de canales de riego. El transporte de nutrientes

desde tierras cultivadas y criaderos de animales causa serios problemas ambientales y de calidad de aguas. La contaminación por nitratos es probablemente de gran importancia en las fuentes de agua rurales. Esta puede estar asociada a fuentes puntuales o difusas, tales como los derrames de riego de tierras fertilizadas y el drenaje de aguas desde criaderos de animales (Seeboonruang, 2012; Raschid-Sally *et al.*, 2001; OMS, 2006; Ken, 2002; Kretschmer *et al.*, 2002; Qadir & Oster, 2004; Rajankar *et al.*, 2009; Torres *et al.*, 2009; Das., 2009). De acuerdo con lo anterior, el aspecto más importante cuando se va a destinar un agua residual para uso agrícola, es el establecimiento de los requisitos mínimos de calidad que debe tener esta, con el fin de garantizar que la misma cumpla con el papel para el cual se le destinó (Asano & Levine, 1996; Torres *et al.*, 2009; Qadir & Oster, 2004). Por lo tanto, en la actualidad se cuenta con una gran cantidad de información a nivel internacional sobre los valores de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos mínimos que debe cumplir un agua para destinarla en uso agrícola, ya que diferentes instituciones y organizaciones de varios países encargadas del control de la calidad del agua para irrigación, han establecido ciertos criterios de protección. Sin embargo, analizar en un agua, todos aquellos parámetros establecidos en la mayoría de regulaciones como criterios mínimos de calidad para riego y determinar si la misma es apta para dicho uso, requerirá de un tiempo apreciable y de una inversión económica significativa, además de que estos valores aislados no permiten hacer una interpretación adecuada y una gestión integral del recurso (Gharibi *et al.*, 2012; Gharsallaoui *et al.*, 2011; Gatica *et al.*, 2012; Ken, 2002).

Un índice global de calidad de aguas residuales para riego que contemple en su composición sólo aquellos factores que sean de mayor preponderancia e importancia para destinar las aguas para uso agrícola, podría ser una alternativa viable para evitar las grandes inversiones económicas y temporales que se deben hacer en el análisis de un sin número de variables fisicoquímicas y microbiológicas en un agua residual. Además, permitiría resumir un sin número de datos en una sola expresión que finalmente orientaría la toma de decisiones con respecto a la conveniencia o no del uso de este tipo de aguas en el sector (Libralato *et al.*, 2010; Wanda *et al.*, 2012). Por lo tanto, en la presente investigación se propone un Índice Global de Calidad de Aguas Residuales para Riego (IGCAR), como una herramienta que permita tomar decisiones prácticas y asertivas para destinar un agua residual como insumo vital del sector agrícola (Gazzaz *et al.*, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que conformarán el IGCAR

Para la seleccionar los parámetros del IGCAR se aplicó la técnica de investigación Delphi de la "Rand Corporations", la cual consiste básicamente en la interrogación a expertos con la ayuda de cuestionarios sucesivos, a fin de poner de manifiesto convergencias de opiniones y deducir eventuales consensos (Cude, 2001). De esta manera, se diseñaron y aplicaron 4 encuestas escalonadas en las que se les solicitó a diferentes expertos que seleccionaran los parámetros que ellos consideraban de obligatorio análisis en un agua residual que se va a destinar para riego. Así en la primera encuesta se presentaron 75 parámetros (físicoquímicos y microbiológicos) de calidad de agua, para que cada uno de los expertos seleccionara los que consideraba de obligatorio análisis en un agua residual, que se va a destinar para uso agrícola. Igualmente, en la misma encuesta, los expertos tuvieron la oportunidad de incluir otras variables de considerarlo necesario. De los resultados obtenidos en la primera encuesta, se eligieron todos aquellos parámetros cuyo porcentaje de selección por los expertos fue mayor o igual al 50%, obteniéndose 62 parámetros con esta calificación. Posteriormente en el diseño de la segunda encuesta se contemplaron solamente las 62 variables obtenidas en la evaluación de la primera encuesta, de los resultados obtenidos en la aplicación de esta segunda encuesta, se eligieron 50 parámetros aplicando el mismo criterio de selección (con un porcentaje de selección mayor o igual al 50%). El anterior proceso se repitió por tercera vez de la misma forma, lográndose una selección de 45 parámetros con la aplicación de la tercera encuesta. Finalmente, con el fin de disminuir aún más el número de parámetros que conformarían el índice de calidad, se aplicó una cuarta encuesta, la cual contenía los 45 parámetros seleccionados de acuerdo con los resultados obtenidos en la tercera encuesta. En esta última se les solicitó a los mismos expertos interrogados en las tres encuestas anteriores, que le asignaran a cada parámetro

una calificación de 1 a 5 de acuerdo con su mayor o menor grado de importancia, siendo 1 la calificación más significativa y 5 la de menos importancia, en el momento de analizar un agua residual para destinarla a uso agrícola. De esta última encuesta se eligieron todos aquellos parámetros que obtuvieron una calificación menor o igual que 3 y cuyo porcentaje de preferencia por los expertos fuera igual o superior al 50%, dando como resultado la elección de 35 variables entre fisicoquímicas y microbiológicas.

Es importante aclarar que por falta de datos disponibles en la literatura en cuanto a los criterios de calidad diferenciados para la salinidad potencial y la salinidad efectiva, estas dos variables se tomaron como una sola definida como salinidad. Así, finalmente los parámetros seleccionados para conformar el IGCAR corresponden a 34: aluminio, arsénico, boro, bicarbonatos, cadmio, calcio, carbonatos, cianuro, cinc, cloro residual, cloruros, cobalto, cobre, coliformes fecales, conductividad, cromo, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), fósforo total, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, nitrógeno total, pH, plomo, porcentaje de sodio intercambiable (PSI), relación de adsorción de sodio (RAS), salinidad, selenio, sodio, sólidos disueltos totales y sulfatos. Para la aplicación de todas las encuestas, se entrevistaron 60 expertos de profesiones afines con el sector agrícola (Ingeniería Agrónoma, Ingeniería Agropecuaria, Administración de Empresas Agropecuarias e Ingeniería Agrícola) de países como Colombia, España, Argentina y México.

Construcción de la curva de calidad para cada parámetro del IGCAR

Para el desarrollo de este proceso se tuvieron en cuenta dos tipos de fuente de información: los criterios de calidad de agua para riego establecidos en más de 35 reglamentaciones y normatividades ambientales existentes en diferentes países y ciudades (Colombia, Ecuador, Costa Rica, Nicaragua, Guatemala, Panamá, Austria, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Estados Unidos, Canadá, Chile, España, México, Arizona, California, Venezuela, República Dominicana, Nigeria, Pakistán, Argentina, Brasil, Naciones Unidas, Florida, El Salvador, Taiwán, Hungría, China, Arabia Saudita, Turquía, Israel, Túnez, Uruguay, Bolivia y Perú); y los antecedentes de los resultados obtenidos en investigaciones y estudios realizados sobre los efectos que pueden tener en los cultivos, suelos, productores y/o consumidores, los diferentes constituyentes presentes en las aguas residuales. Básicamente, para la construcción de la curva de calidad para cada parámetro seleccionado para el IGCAR, se llevaron a cabo los siguientes dos pasos:

Establecimiento de la relación entre la concentración y el valor de calidad Q para cada parámetro: cada parámetro debe tener su propia curva de calidad sobre una escala donde es considerado "bueno" o "malo" para riego de acuerdo con los efectos que pueda producir, así se estableció un valor de calidad (Q) que va desde 0 (el peor) hasta 100 (el mejor) para el rango de concentraciones seleccionadas para cada parámetro. De esta manera, se asignó un valor de $Q = 100$, al intervalo de concentraciones de cada parámetro en el que la mayoría de estudios revisados demostraron que no tienen ningún efecto negativo sobre los cultivos, el suelo, los productores y/o los consumidores. En un rango de $70 \leq Q < 100$, se ubicó el conjunto de valores máximos admisibles establecidos en las normatividades revisadas para cada parámetro; ya que por ser éstos los límites máximos permisibles, se supone que no tendrán ningún efecto negativo y por lo tanto, se presume que su grado de restricción con respecto a su uso es bajo. No obstante, antes de tomar ésta decisión, se corroboró en varias investigaciones si efectivamente dichos valores no tenían un efecto negativo sobre dichos aspectos. En los casos en que se identificaron divergencias o contrariedades entre los valores establecidos en las normatividades y los encontrados en las investigaciones, se tuvo preferencia por los datos divulgados en las diferentes investigaciones y estudios revisados. Para un rango de $20 \leq Q < 70$, los valores de las concentraciones asignadas se realizó de acuerdo con un análisis detallado y minucioso de los resultados encontrados en diferentes estudios e investigaciones sobre la relación de la concentración del parámetro y su efecto. Por lo tanto, se propuso hacer un uso del agua residual para riego con un grado de restricción moderado a severo, ya que su efecto puede variar de acuerdo con el tipo de cultivo, suelo, consumidor y/o el productor. Finalmente, se asignó un valor de $Q < 20$, al rango de concentraciones del parámetro donde se encontró que podrían tener algún efecto nocivo. Para efectos de codificación y fácil interpretación también a cada rango de Q se le asignó un color específico (Torres *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2001).

Obtención de la expresión matemática para cada parámetro: a partir de la correlación establecida para cada parámetro entre su concentración y el valor asignado para Q en la escala de calidad, se procedió a construir su respectiva curva de calidad. Luego se trazó la línea de tendencia que correspondiera al mejor ajuste y se obtuvo la respectiva ecuación matemática que permite calcular el valor de calidad Q de acuerdo con la concentración del parámetro.

Clasificación de los parámetros del IGCAR

Debido a que aún después de la aplicación de las 4 encuestas orientadas a seleccionar los parámetros que conformarían el IGCAR, todavía se tenía un número considerado de ellos (34 parámetros), fue necesario recurrir a otra estrategia que permitiera disminuir aún más la cantidad de parámetros que conformarían el IGCAR, de manera que no exigiera una alta inversión en dinero y tiempo, pero sin sacrificar la calidad del agua para riego. Por lo tanto, los parámetros se clasificaron en básicos y complementarios de acuerdo con su influencia en el grado de calidad del agua residual para riego. Así, se clasificaron como básicos aquellos parámetros cuya concentración es considerada significativa, cualesquiera que sea su valor, y por lo tanto, se recomienda que siempre sean considerados en el cálculo del IGCAR. Como parámetros complementarios, se escogieron aquellos para los que se considera que sólo afecta la calidad del agua a partir de una determinada concentración y para cierto tipo de suelos y de cultivos, por lo que se recomienda que sólo se tengan en cuenta en el IGCAR, de acuerdo con los intereses de la persona que lo vaya a calcular (Cude, 2001; Torres *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2001).

Selección del método de agregación para el cálculo del IGCAR

La estructura del cálculo de la mayoría de los ICAs, se basa en la normalización de los parámetros que los conforman de acuerdo con sus concentraciones, para su posterior ponderación en función de su importancia en la percepción general de la calidad del agua para su respectivo uso; se calcula mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes funciones matemáticas (Cude, 2001; Torres *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2001). Así, un aspecto muy importante que generalmente se tiene en cuenta para la formulación y construcción de la mayoría de los ICAs es la asignación de pesos (ponderación) a cada uno de los parámetros que los constituirá (Almeida *et al.*, 2012). Para establecer los factores de ponderación de los parámetros seleccionados para el IGCAR, se realizó una quinta encuesta, en la cual se les solicitó a los mismos 60 expertos que asignarán a cada uno de los 34 parámetros seleccionados en la cuarta encuesta un número de 1 a 4 (siendo 1 para los parámetros de mayor importancia y 4 para los parámetros de menor importancia) de acuerdo con su capacidad de producir efectos sobre el cultivo, el suelo, los productores y los consumidores al ser utilizada un agua residual en riego. Posteriormente, se procedió a realizar un estudio comparativo de los diferentes métodos de agregación utilizados para calcular índices de calidad de aguas (ICAs), resaltando sus ventajas y desventaja y de acuerdo con este análisis se eligió el método de agregación con su respectiva ecuación matemática.

Establecimiento de la escala de calidad y forma de interpretación del IGCAR

Coherentes con los criterios establecidos en asignar los valores de calidad Q para cada uno de los parámetros contemplados en la formulación del IGCAR, se procedió a realizar una escala de clasificación de calidad de agua para riego con su respectiva interpretación y codificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros seleccionados para el IGCAR

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos y sistematizados para las tres primeras encuestas aplicadas, de las cuales se seleccionaron 62, 50 y 45 parámetros respectivamente. En la Tabla 2 se muestran los resultados de la cuarta encuesta de la cual se eligieron 35 parámetros.

Tabla 1: Resultados obtenidos en la aplicación de la primera, segunda y tercera encuestas.

Parámetro	Unidades	Primera Encuesta		Segunda Encuesta		Tercera Encuesta	
		Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
Acidez	mg/L CaCO ₃	2	3,33	N.C	N.C	N.C	N.C
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	1	1,67	N.C	N.C	N.C	N.C
Alfa total	Bq/L	10	16,67	N.C	N.C	N.C	N.C
Aluminio	mg/L	45	75,00	44	73,33	43	71,67
Amoníaco	mg/L	32	53,33	35	58,33	28	46,67
Antimonio	mg/L	31	51,67	15	25,00	N.C	N.C
Arsénico	mg/L	45	75,00	47	78,33	45	75,00
Bario	mg/L	35	58,33	36	60,00	20	33,33
Berilio	mg/L	34	56,67	35	58,33	37	61,67
Beta total	Bq/L	10	16,67	N.C	N.C	N.C	N.C
Bicarbonatos	mg/L	40	66,67	32	53,33	35	58,33
Bismuto	mg/L	34	56,67	19	31,67	N.C	N.C
Boro	mg/L	32	53,33	35	58,33	36	60,00
Cadmio	mg/L	32	53,33	38	63,33	42	70,00
Calcio	mg/L	45	75,00	49	81,67	32	53,33
Carbohidratos	mg/L	35	58,33	25	41,67	N.C	N.C
Carbonatos	mg/L	31	51,67	33	55,00	31	51,67
Cianuro	mg/L	34	56,67	37	61,67	34	56,67
Cinc	mg/L	38	63,33	43	71,67	45	75,00
Cloro residual	mg/L	53	88,33	37	61,67	30	50,00
Cloruros	mg/L	43	71,67	46	76,67	40	66,67
Cobalto	mg/L	41	68,33	50	83,33	48	80,00
Cobre	mg/L	46	76,67	40	66,67	45	75,00
Coliformes fecales	NMP/100mL	43	71,67	41	68,33	53	88,33
Coliformes totales	NMP/100mL	41	68,33	45	75,00	40	66,67
Color	Unidades Pt-Co	0	0,00	N.C	N.C	N.C	N.C
Conductividad	umhos/cm	33	55,00	37	61,67	40	66,67
COT	mg/L	9	15,00	N.C	N.C	N.C	N.C
Cromo	mg/L	41	68,33	43	71,67	42	70,00
DBO ₅	mg O ₂ /L	48	80,00	44	73,33	35	58,33
Detergentes	mg/L	34	56,67	37	61,67	30	50,00
DQO	mg O ₂ /L	33	55,00	25	41,67	N.C	N.C
Dureza	mg/L CaCO ₃	12	20,00	N.C	N.C	N.C	N.C
E. Coli	NMP/100mL	42	70,00	46	76,67	31	51,67
Enterococos	NMP/100mL	41	68,33	39	65,00	32	53,33
Estaño	mg/L	37	61,67	33	55,00	18	30,00
Fluor	mg/L	35	58,33	29	48,33	N.C	N.C
Fluoruros	mg/L	34	56,67	33	55,00	21	35,00

Parámetro	Unidades	Primera Encuesta		Segunda Encuesta		Tercera Encuesta	
		Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
Fosfatos	mg/L	39	65,00	28	46,67	N.C	N.C
Fósforo total	mg/L	40	66,67	38	63,33	35	58,33
Grasas y aceites	mg/L	30	50,00	23	38,33	N.C	N.C
Huevos de helminto	Unidad/L	36	60,00	10	16,67	N.C	N.C
Hierro	mg/L	49	81,67	52	86,67	49	81,67
Índice de fenol	mg/L	35	58,33	30	50,00	30	50,00
Litio	mg/L	31	51,67	17	28,33	N.C	N.C
Magnesio	mg/L	37	61,67	35	58,33	30	50,00
Manganeso	mg/L	45	75,00	44	73,33	42	70,00
Mercurio	mg/L	43	71,67	47	78,33	51	85,00
Molibdeno	mg/L	37	61,67	35	58,33	30	50,00
Níquel	mg/L	45	75,00	47	78,33	49	81,67
Nitratos	mg/L	48	80,00	38	63,33	32	53,33
Nitritos	mg/L	30	50,00	15	25,00	N.C	N.C
Nitrógeno total	mg/L	47	78,33	49	81,67	42	70,00
Olor y sabor	Aceptable	0	0,00	N.C	N.C	N.C	N.C
Oro	mg/L	0	0,00	N.C	N.C	N.C	N.C
Oxígeno disuelto	mg/L	36	60,00	30	50,00	18	30,00
Paladio	mg/L	0	0,00	N.C	N.C	N.C	N.C
Ph	Unidades	52	86,67	55	91,67	56	93,33
Plata	mg/L	34	56,67	47	78,33	35	58,33
Platino	mg/L	35	58,33	8	13,33	N.C	N.C
Plomo	mg/L	43	71,67	46	76,67	32	53,33
Proteínas	mg/L	6	10,00	N.C	N.C	N.C	N.C
PSI	%	40	66,67	33	55,00	32	53,33
RAS	Adimensional	41	68,33	31	51,67	30	50,00
Salinidad efectiva	mg/L	28	46,67	34	56,67	35	58,33
Salinidad potencial	mg/L	33	55,00	34	56,67	35	58,33
Selenio	mg/L	36	60,00	34	56,67	32	53,33
Sodio	mg/L	33	55,00	31	51,67	35	58,33
SDT	mg/L	31	51,67	30	50,00	31	51,67
SST	mg/L	31	51,67	32	53,33	30	50,00
Sulfatos	mg/L	43	71,67	37	61,67	30	50,00
Talio	mg/L	2	3,33	N.C	N.C	N.C	N.C
Telurio	mg/L	30	50,00	13	21,67	N.C	N.C
Turbiedad	UNT	3	5,00	N.C	N.C	N.C	N.C
Vanadio	mg/L	39	65,00	33	55,00	30	50,00
Otro	Ninguna	0	0,00	0	0,00	0	0,00

N.C.: Parámetro no contemplado en la encuesta, COT: Carbono Orgánico Total, DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno, DQO: Demanda Química de Oxígeno, PSI: Porcentaje de Sodio Intercambiable, RAS: Relación de Adsorción de Sodio, SDT: Sólidos Disueltos Totales, SST: Sólidos Suspendidos Totales.

Tabla 2: Resultados obtenidos en la aplicación de la cuarta encuesta.

Parámetro	Unidades	Calificación									
		1		2		3		4		5	
		Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
Aluminio	mg/L	31	51,67	21	35,00	8	13,33	0	0,00	0	0,00
Arsénico	mg/L	21	35,00	35	58,33	4	6,67	0	0,00	0	0,00
Berilio	mg/L	0	0,00	5	8,33	10	16,67	20	33,33	25	41,67
Bicarbonatos	mg/L	7	11,67	32	53,33	21	35,00	0	0,00	0	0,00
Boro	mg/L	8	13,33	10	16,67	32	53,33	7	11,67	3	5,00
Cadmio	mg/L	14	23,33	33	55,00	13	21,67	0	0,00	0	0,00
Calcio	mg/L	38	63,33	16	26,67	6	10,00	0	0,00	0	0,00
Carbonatos	mg/L	34	56,67	23	38,33	3	5,00	0	0,00	0	0,00
Cianuro	mg/L	45	75,00	15	25,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cinc	mg/L	14	23,33	35	58,33	10	16,67	1	1,67	0	0,00
Cloro	mg/L										
Residual		10	16,67	32	53,33	8	13,33	2	3,33	8	13,33
Cloruros	mg/L	9	15,00	10	16,67	36	60,00	3	5,00	2	3,33
Cobalto	mg/L	20	33,33	9	15,00	30	50,00	1	1,67	0	0,00
Cobre	mg/L	10	16,67	37	61,67	8	13,33	3	5,00	2	3,33
Coliformes	NMP/100mL										
Fecales		55	91,67	5	8,33	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Coliformes	NMP/100mL										
Totales		5	8,33	10	16,67	15	25,00	20	33,33	10	16,67
Conductividad	Umhos/cm	36	60,00	20	33,33	3	5,00	1	1,67	0	0,00
Cromo	mg/L	17	28,33	7	11,67	34	56,67	1	1,67	1	1,67
DBO ₅	mg O ₂ /L	37	61,67	15	25,00	3	5,00	3	5,00	2	3,33
Detergentes	mg/L	1	1,67	3	5,00	6	10,00	19	31,67	31	51,67
E. coli	NMP/100mL	14	23,33	12	20,00	10	16,67	8	13,33	16	26,67
Enterococos	NMP/100mL	6	10,00	10	16,67	21	35,00	18	30,00	5	8,33
Fósforo Total	mg/L	23	38,33	36	60,00	1	1,67	0	0,00	0	0,00
Hierro	mg/L	11	18,33	15	25,00	34	56,67	0	0,00	0	0,00
Índice de	mg/L										
Fenol		9	15,00	12	20,00	21	35,00	13	21,67	5	8,33
Magnesio	mg/L	37	61,67	21	35,00	2	3,33	0	0,00	0	0,00
Manganeso	mg/L	21	35,00	31	51,67	3	5,00	2	3,33	3	5,00
Mercurio	mg/L	39	65,00	10	16,67	9	15,00	2	3,33	0	0,00
Molibdeno	mg/L	8	13,33	10	16,67	30	50,00	8	13,33	4	6,67
Níquel	mg/L	17	28,33	36	60,00	7	11,67	0	0,00	0	0,00
Nitratos	mg/L	20	33,33	15	25,00	10	16,67	7	11,67	8	13,33
Nitrógeno	mg/L										
Total		23	38,33	37	61,67	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Ph	Unidades	40	66,67	20	33,33	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Plata	mg/L	9	15,00	8	13,33	20	33,33	10	16,67	13	21,67
Plomo	mg/L	17	28,33	39	65,00	4	6,67	0	0,00	0	0,00
PSI	%	15	25,00	8	13,33	32	53,33	5	8,33	0	0,00
RAS	Adimensional	14	23,33	9	15,00	33	55,00	3	5,00	1	1,67
Salinidad	mg/L										
Potencial		15	25,00	36	60,00	9	15,00	0	0,00	0	0,00

Parámetro	Unidades	Calificación									
		1		2		3		4		5	
		Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
Salinidad Efectiva	mg/L	15	25,00	36	60,00	9	15,00	0	0,00	0	0,00
Selenio	mg/L	18	30,00	9	15,00	30	50,00	2	3,33	1	1,67
Sodio	mg/L	14	23,33	36	60,00	6	10,00	3	5,00	1	1,67
Sólidos Disueltos	mg/L	8	13,33	32	53,33	13	21,67	3	5,00	4	6,67
Sólidos Suspendidos	mg/L	11	18,33	19	31,67	12	20,00	8	13,33	10	16,67
Sulfatos	mg/L	12	20,00	10	16,67	33	55,00	3	5,00	2	3,33
Vanadio	mg/L	10	16,67	8	13,33	18	30,00	15	25,00	9	15,00

Curva de calidad para cada parámetro del IGCAR

En la Tabla 3 se encuentra la expresión matemática correspondiente a la curva de calidad construida para cada parámetro seleccionado para el IGCAR, con su respectivo coeficiente de regresión lineal; el cual fue mayor a 0,99 para todos los parámetros, excepto para el pH que fue 0,98. Igualmente, en la misma tabla se muestran las restricciones establecidas para calcular el valor de calidad Q para cada parámetro a partir de su respectiva concentración.

Tabla 3: Ecuación matemática y ajuste de la curva de calidad de cada parámetro.

Parámetro	Unidad	Q	R ²	Restricción
Aluminio	mg/L	$Q = 0,1145Al^2 - 6,8168Al + 100,9$	$R^2 = 0,9994$	$Al \leq 0,2: Q = 100$ $Al > 20,0: Q = 0$
Arsénico	mg/L	$Q = 1,6218As^2 - 26,302As + 90,353$	$R^2 = 0,9973$	$As \leq 0,08: Q = 100$ $As > 4,0: Q = 0$
Bicarbonatos	mg/L	$Q = -0,0011(HCO_3^-)^2 - 0,311 HCO_3^- + 113,18$	$R^2 = 0,9982$	$HCO_3^- \leq 40,0: Q = 100$ $HCO_3^- > 180,0: Q = 0$
Boro	mg/L	$Q = -0,1736B^2 - 4,4902B + 100,78$	$R^2 = 0,9981$	$B \leq 0,5: Q = 100$ $B > 14,0: Q = 0$
Cadmio	mg/L	$Q = 36851Cd^2 - 3658,9Cd + 111,47$	$R^2 = 0,9938$	$Cd \leq 0,003: Q = 100$ $Cd > 0,05: Q = 0$
Calcio	mg/L	$Q = 6E-05Ca^2 - 0,4819Ca + 110,82$	$R^2 = 0,9953$	$Ca \leq 20,0: Q = 100$ $Ca > 200,0: Q = 0$
Carbonatos	mg/L	$Q = -0,0266(CO_3^{2-})^2 - 5,7487CO_3^{2-} + 194,41$	$R^2 = 0,9958$	$CO_3^{2-} \leq 15,0: Q = 100$ $CO_3^{2-} > 28,0: Q = 0$
Cianuros	mg/L	$Q = -975,38(CN^-)^2 - 228,45CN^- + 103,35$	$R^2 = 0,9948$	$CN^- \leq 0,02: Q = 100$ $CN^- > 0,2: Q = 0$
Cinc	mg/L	$Q = 0,5303Zn^2 - 20,129Zn + 109,25$	$R^2 = 0,9967$	$Zn \leq 0,5: Q = 100$

Parámetro	Unidad	Q	R ²	Restricción
Cloro Residual	mg/L	$Q = -4,8745Cl^2 + 9,5801Cl + 93,143$	$R^2 = 0,9943$	100 Zn > 5,0: Q = 0 Cl ≤ 1,0: Q = 100 Cl > 5,0: Q = 0 Cl ≤ 40,0: Q = 100
Cloruros	mg/L	$Q = 0,0003(Cl^-)^2 - 0,3844Cl^- + 117,99$	$R^2 = 0,9969$	100 Cl^- > 400,0: Q = 0
Cobalto	mg/L	$Q = -2,0855Co^3 + 18,344Co^2 - 54,982Co + 96,345$	$R^2 = 0,9932$	Co ≤ 0,01: Q = 100 Co > 5,0: Q = 0
Cobre	mg/L	$Q = 3,249Cu^2 - 32,482Cu + 102,03$	$R^2 = 0,9981$	Cu ≤ 0,1: Q = 100 Cu > 5,0: Q = 0
Coliformes Fecales	NMP/100 MI	$Q = -3E-10CF^3 + 6E-06CF^2 - 0,0337CF + 100,66$	$R^2 = 0,994$	CF ≤ 100: Q = 100 CF > 10000: Q = 0
Conductividad Específica para un 0 < RAS ≤ 3		$Q = 852,86CE^3 - 1208,7CE^2 + 580,06CE - 5,4911$	$R^2 = 0,9964$	CE ≥ 0,7: Q = 100 CE < 0,05: Q = 0
Conductividad Específica para un 3 < RAS ≤ 6		$Q = 158,86CE^3 - 379,92CE^2 + 304,19CE + 8,2721$	$R^2 = 0,9959$	CE ≥ 1,2: Q = 100 CE < 0,05: Q = 0
Conductividad Específica para un 6 < RAS ≤ 12	Ds/m	$Q = 34,731CE^3 - 137,41CE^2 + 188,21CE + 0,5026$	$R^2 = 0,9907$	CE ≥ 1,9: Q = 100 CE < 0,1: Q = 0
Conductividad Específica para un 12 < RAS ≤ 20		$Q = 1,9266CE^3 - 21,264CE^2 + 82,128CE - 7,4198$	$R^2 = 0,9952$	CE ≥ 2,9: Q = 100 CE < 0,34: Q = 0
Conductividad Específica para un 20 < RAS ≤ 40		$Q = -0,8393CE^3 + 2,635CE^2 + 34,735CE - 36,631$	$R^2 = 0,9941$	CE ≥ 5,0: Q = 100 CE < 1,2: Q = 0
Cromo	mg/L	$Q = -0,962Cr^3 + 9,1416Cr^2 - 36,073Cr + 96,813$	$R^2 = 0,9958$	Cr ≤ 0,01: Q = 100 Cr > 5,0: Q = 0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Mg O ₂ /L	$Q = 2E-05DBO^3 - 0,0051DBO^2 + 0,0328DBO + 101,07$	$R^2 = 0,9964$	DBO ≤ 25,0: Q = 100 DBO > 200,0: Q = 0
Fósforo Total	mg/L	$Q = -0,6271P^3 + 8,5P^2 - 41,667P + 114,91$	$R^2 = 0,9951$	P ≤ 0,5: Q = 100 P > 7,0: Q = 0
Hierro	mg/L	$Q = -0,8304Fe^3 + 7,0953Fe^2 - 27,855Fe + 102,32$	$R^2 = 0,9985$	Fe ≤ 0,1: Q = 100 Fe > 5,5: Q = 0
Magnesio	mg/L	$Q = 0,0002Mg^3 - 0,0254Mg^2 - 0,1481Mg + 101$	$R^2 = 0,9986$	Mg ≤ 6,0: Q = 100 Mg > 72,0: Q = 0
Manganeso	mg/L	$Q = -2,0319Mn^3 + 18,875Mn^2 - 60,037Mn +$	$R^2 = 0,998$	Mn ≤ 0,07: Q = 100

Parámetro	Unidad	Q	R ²	Restricción
		101,7		100
Mercurio	mg/L	$Q = -8E+11Hg^3 + 8E+08Hg^2 - 366667Hg + 130$	$R^2 = 0,9959$	Mn > 5,0: Q = 0 Hg ≤ 1 x 10 ⁻⁴ : Q = 100 Hg > 5 x 10 ⁻⁴ : Q = 0
Molibdeno	mg/L	$Q = -2035,2Mo^3 + 1896,1Mo^2 - 595,43Mo + 102,26$	$R^2 = 0,993$	Mo ≤ 0,01: Q = 100 Mo > 0,5: Q = 0
Níquel	mg/L	$Q = -1,0151Ni^3 + 9,3212Ni^2 - 37,836Ni + 98,207$	$R^2 = 0,9967$	Ni ≤ 0,05: Q = 100 Ni > 5,0: Q = 0
Nitrógeno Total	mg/L	$Q = -0,0014N^3 + 0,0788N^2 - 3,2374N + 115$	$R^2 = 0,9979$	N ≤ 5,0: Q = 100 N > 30,0: Q = 0
pH	Unidades	$Q = 101,54 e^{\left\{-0,5\left(\frac{pH-7,00}{1,56}\right)^2\right\}}$	$R^2 = 0,9855$	pH ≤ 1,5 y pH ≥ 12,5: Q = 0
Plomo	Mg/L	$Q = -1,3396Pb^3 + 11,237Pb^2 - 39,35Pb + 97,261$	$R^2 = 0,9942$	Pb ≤ 0,025: Q = 100 Pb > 5,0: Q = 0
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	%	$Q = 0,0328PSI^3 - 1,1585PSI^2 + 4,001PSI + 105,66$	$R^2 = 0,9975$	PSI ≤ 5,0: Q = 100 PSI > 15,0: Q = 0
Salinidad	µmhos/cm	$Q = -2E-07SA^3 + 0,0003SA^2 - 0,213SA + 111,68$	$R^2 = 0,9948$	SA ≤ 750: Q = 100 SA > 3000: Q = 0
Selenio	Mg/L	$Q = -27480Se^3 + 11117Se^2 - 1556,4Se + 106,39$	$R^2 = 0,9988$	Se ≤ 0,005: Q = 100 Se > 0,2: Q = 0
Sodio	Mg/L	$Q = 0,0022Na^2 - 1,1218Na + 134,77$	$R^2 = 0,9971$	Na ≤ 30,0: Q = 100 Na > 180,0: Q = 0
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Mg/L	$Q = 8E-06SDT^2 - 0,0655SDT + 130,08$	$R^2 = 0,9995$	SDT ≤ 450: Q = 100 SDT > 2000: Q = 0
Sulfatos	Mg/L	$Q = -2E-07(SO_4^{2-})^3 + 0,0003(SO_4^{2-})^2 - 0,213SO_4^{2-} + 111,68$	$R^2 = 0,9948$	SO ₄ ²⁻ ≤ 48: Q = 100 SO ₄ ²⁻ > 720: Q = 0

Q: Valor de calidad numérico, R²: Coeficiente de correlación lineal.

Clasificación de los parámetros del IGCAR

En la Tabla 4 se muestra la clasificación de cada parámetro. Un análisis cuidadoso y comparativo sobre los resultados obtenidos en los estudios e investigaciones que se han realizado con respecto a los posibles efectos sobre el suelo, los cultivos, los productores y los consumidores, que pueden tener diferentes parámetros fisicoquímicos como el aluminio, cadmio, cromo, DBO₅, hierro, pH, calcio, sodio, cloruros, magnesio, PSI, RAS,

bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, salinidad y conductividad eléctrica; permite clasificar estos parámetros como básicos, pues su presencia siempre va a ser determinante para la evaluación del agua residual para riego cualquiera que sea su concentración en el agua residual. Además, de que sus consecuencias se deben generalmente a procesos sinérgicos, así la presencia y/o cantidad de alguno de estos parámetros puede afectar la disponibilidad y/o concentración de uno o varios de los otros parámetros. Los 17 parámetros restantes se consideraron como complementarios (Cude, 2001; Torres *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2001).

Tabla 4: Factores y pesos de ponderación y clasificación de cada parámetro.

Parámetro	Unidad	Factor de Ponderación n	Peso de Ponderación n	Tipo de Parámetro	Parámetro	Unidad	Factor de Ponderación n	Peso de Ponderación n	Tipo de Parámetro
Aluminio	mg/L	1	0,01	B	Fósforo Total	mg/L	4	0,06	C
Arsénico	mg/L	2	0,03	C	Hierro	mg/L	3	0,04	B
Bicarbonatos	mg/L	1	0,01	B	Magnesio	mg/L	1	0,01	B
Boro	mg/L	1	0,01	C	Manganeso	mg/L	4	0,06	C
Cadmio	mg/L	2	0,03	B	Mercurio	mg/L	1	0,01	C
Calcio	mg/L	2	0,03	B	Molibdeno	mg/L	4	0,06	C
Carbonatos	mg/L	1	0,01	B	Níquel	mg/L	2	0,03	C
Cianuro	mg/L	2	0,03	C	Nitrógeno Total	mg/L	4	0,06	C
Cinc	mg/L	2	0,03	C	pH	Unidades	1	0,01	B
Cloro Residual	mg/L	4	0,06	C	Plomo	mg/L	4	0,06	C
Cloruros	mg/L	1	0,01	B	PSI	%	1	0,01	B
Cobalto	mg/L	3	0,04	C	RAS	Adimensional	1	0,01	B
Cobre	mg/L	3	0,04	C	Salinidad	mg/L	1	0,01	B
Coliformes Fecales	NMP/100 MI	1	0,01	C	Selenio	mg/L	3	0,04	C
Conductividad	umhos/cm	1	0,01	B	Sodio	mg/L	1	0,01	B
Cromo	mg/L	1	0,01	B	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	3	0,04	C
DBO ₅	Mg O ₂ /L	3	0,04	B	Sulfatos	mg/L	3	0,04	B

B: Básico; C: Complementario.

Selección del método de agregación para el cálculo del IGCAR

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en la aplicación de la quinta encuesta, de la cual se escogieron como parámetros con un factor de ponderación igual a 1, aquellos cuyo porcentaje de selección para dicho parámetro fue el mayor de las valoraciones dadas por cada uno de los expertos para los cuatro factores de ponderación. Por otra parte, en la misma tabla se muestra el peso de ponderación de cada parámetro, determinado a partir de la división del valor de su factor de ponderación individual (uno, dos, tres o cuatro) entre la suma total de los factores de ponderación asignados a todos los parámetros. Si en el momento en que se vaya a calcular el IGCAR, no se cuenta con los datos de todos los parámetros contemplados para calcularlo (excepto los básicos que siempre se deben evaluar), se puede recalcular los pesos de ponderación relativos de cada parámetro a partir de los factores de ponderación utilizando la misma metodología.

Tabla 5: Resultados obtenidos en la aplicación de la quinta encuesta.

Parámetro	Unidades	Calificación							
		1		2		3		4	
		Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
Aluminio	mg/L	37	61,67	18	30,00	5	8,33	0	0,00
Arsénico	mg/L	19	31,67	32	53,33	4	6,67	5	8,33
Bicarbonatos	mg/L	29	48,33	11	18,33	15	25,00	5	8,33
Boro	mg/L	28	46,67	15	25,00	14	23,33	3	5,00
Cadmio	mg/L	15	25,00	27	45,00	10	16,67	8	13,33
Calcio	mg/L	19	31,67	36	60,00	5	8,33	0	0,00
Carbonatos	mg/L	26	43,33	15	25,00	9	15,00	10	16,67
Cianuro	mg/L	21	35,00	32	53,33	5	8,33	2	3,33
Cinc	mg/L	13	21,67	25	41,67	15	25,00	7	11,67
Cloro Residual	mg/L	1	1,67	3	5,00	16	26,67	40	66,67
Cloruros	mg/L	36	60,00	10	16,67	10	16,67	4	6,67
Cobalto	mg/L	15	25,00	13	21,67	30	50,00	2	3,33
Cobre	mg/L	5	8,33	14	23,33	28	46,67	13	21,67
Coliformes Fecales	NMP/100mL	43	71,67	6	10,00	7	11,67	4	6,67
Conductividad	umhos/cm	36	60,00	20	33,33	2	3,33	2	3,33
Cromo	mg/L	38	63,33	14	23,33	5	8,33	3	5,00
DBO ₅	Mg O ₂ /L	4	6,67	20	33,33	33	55,00	3	5,00
Fósforo Total	mg/L	13	21,67	10	16,67	3	5,00	34	56,67
Hierro	mg/L	7	11,67	3	5,00	35	58,33	15	25,00
Magnesio	mg/L	28	46,67	16	26,67	9	15,00	7	11,67
Manganeso	mg/L	13	21,67	11	18,33	14	23,33	22	36,67
Mercurio	mg/L	49	81,67	6	10,00	3	5,00	2	3,33
Molibdeno	mg/L	9	15,00	15	25,00	9	15,00	27	45,00
Níquel	mg/L	13	21,67	28	46,67	16	26,67	3	5,00
Nitrógeno Total	mg/L	7	11,67	8	13,33	14	23,33	31	51,67
Ph	Unidades de pH	45	75,00	15	25,00	0	0,00	0	0,00
Plomo	mg/L	10	16,67	9	15,00	15	25,00	26	43,33
PSI	%	23	38,33	17	28,33	12	20,00	8	13,33
RAS	Adimensional	36	60,00	11	18,33	12	20,00	1	1,67
Salinidad	mg/L	35	58,33	16	26,67	9	15,00	0	0,00
Selenio	mg/L	13	21,67	9	15,00	31	51,67	7	11,67
Sodio	mg/L	42	70,00	15	25,00	2	3,33	1	1,67
Sólidos Totales	Disueltos mg/L	18	30,00	10	16,67	30	50,00	2	3,33
Sulfatos	mg/L	13	21,67	11	18,33	31	51,67	5	8,33

Los ICAs, son considerados como una de las formas más efectivas para comunicar información sobre tendencias del aspecto ambiental de las aguas, y uno de los aspectos más importantes en su estimación es la correcta elección el método de agregación para su cálculo (Akkoyunlu & Akiner, 2012; Almeida *et al.*, 2012). Existen dos enfoques para el cálculo de un ICA; el primero es la suma ponderada, en ella cada puntaje es multiplicado por su peso; luego, estos productos son sumados para obtener el ICA (Cude, 2001; Torres *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2001). El segundo enfoque, es el producto ponderado, en el que los pesos dan importancia a los puntajes y todos ellos son ponderados de acuerdo a la importancia de los pesos y luego son multiplicados. De acuerdo

con el modelo matemático utilizado, este método podría evitar el eclipsamiento y la ambigüedad en los datos. En la presente investigación, se eligió como método de agregación el promedio geométrico ponderado para calcular el IGCAR. Este método se seleccionó porque su función matemática evita el eclipsamiento y la ambigüedad, es decir, impide que un índice de calidad sea interpretado como satisfactorio aunque el valor de calidad para un parámetro sea cero o insatisfactorio. Por lo tanto, si el valor de calidad para uno de los parámetros que constituye el índice es cero, entonces el valor del índice de calidad automáticamente será cero. La ecuación 1 corresponde a la expresión matemática que se utilizó para el cálculo del IGCAR.

$$IGCAR = \prod_{i=1}^n (Q_i)^{w_i} \tag{1}$$

Donde:

n = Es el número total de parámetros a contemplar en el IGCAR.





Q_i = Es el valor de la calidad del parámetro i , cuyo valor se encuentra entre 0 y 100 de acuerdo con su curva de calidad.

w_i = Es el valor del peso de ponderación del parámetro i , cuyo valor está entre 0 y 1 de acuerdo con su factor de ponderación con respecto a los otros parámetros.

Escala de calidad y forma de interpretación del valor obtenido para el IGCAR

Las categorías, esquemas o escalas de clasificación, son un punto de igual o mayor interés que todos los pasos anteriores, pues es aquí donde finalmente el valor obtenido para el ICA totalizado por la fórmula de agregación, es transformado en una característica que define la calidad final del agua para su uso en riego. De acuerdo con lo anterior, el resultado final del cálculo del IGCAR, dará un número entre cero (0) y cien (100), donde cero representará una calidad de agua para riego muy pobre y cien representará una calidad de agua para riego excelente. No obstante, el resultado puede ser interpretado más detalladamente con base en la información contemplada en la Tabla 6 donde se presenta la escala de clasificación del agua para riego de acuerdo con su calidad, y además, se especifica el grado de restricción con respecto a su uso con su comentario explicativo. Es importante aclarar que tales categorías se definieron con anticipación y tiene completa concordancia con los criterios establecidos para el desarrollo de las curvas de calidad de cada uno de los parámetros que constituirán el IGCAR, esto con el fin de que los sistemas puedan leerse por separado desde los valores de calidad de cada parámetro guardando armonía con el totalizado.

Tabla 6: Escala de calidad para el IGCAR.

Valor del ICAR	Calidad del Agua	Grado de Restricción	Comentario	Color
IGCAR = 100	Excelente	Ninguno	No tiene ningún grado de restricción con respecto a su uso.	
$70 \leq \text{IGCAR} < 100$	Buena	Bajo	Su grado de restricción con respecto a su uso es bajo.	
$20 \leq \text{IGCAR} < 70$	Aceptable	Moderado	Su grado de restricción con respecto a su uso es moderado.	
IGCAR < 20	No aceptable	Severo	Su grado de restricción con respecto a su uso es muy severo.	

CONCLUSIONES

Se propone un Índice Global de Calidad de Agua para Riego (IGCAR) como una herramienta adecuada y económicamente viable para la gestión del recurso hídrico en el sector agrícola que disminuiría los costos en el análisis de las aguas y además, permitiría resumir un sin número de datos en una sola expresión que finalmente orientaría la toma de decisiones con respecto a la conveniencia o no del uso de aguas residuales en el sector.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todos los profesionales y expertos que diligenciaron y respondieron las encuestas.

REFERENCIAS

1. Almeida, C.; González, S.O., Mallea, M. & González, P. (2012). A recreational water quality index using chemical, physical and microbiological parameters. *Environ. Sc. Pollut. Res.*, 19(8), 3400-3411.
2. Almeida, C.; Quintar, S.; González, P. & Mallea, M. (2008). Assessment of irrigation water quality. A proposal of a quality profile. *Environ. Monit. Assessm.*, 142(1-3), 149-152.
3. Almeida, C.A.; Quintar, S.; González, P. & Mallea, M.A. (2007). Influence of urbanization and tourist activities on the water quality of the Potrero de los Funes River (San Luis – Argentina). *Environ. Monit. Assessm.*, 133(1-3), 459-465.
4. Asano, T. & Levine, A. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present and future. *Wat. Sci. Tech.*, 33(10-11), 1-14.
5. Akkoyunlu, A. & Akiner, A.E. (2012). Pollution evaluation in streams using water quality indices: A case study from Turkey's Sapanca Lake Basin. *Ecological Indicators*, 18, 501-511.
6. Cude, C.G. (2001). Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness. *J. Amer. Wat. Res. Assoc.*, 37(1), 125-137.
7. Das, M. (2009). Identification of Effluent Quality Indicators for Use in Irrigation – A Factor Analysis Approach. *J. Scientific & Ind. Research.*, 68, 634-639.
8. Faithful, J. & Finlayson, W. (2005). Water quality assessment for sustainable agriculture the wet tropics-a community-assisted approach. *Marine Pollution Bulletin*, 51(1-4), 99-112.
9. Fernández, N., Ramírez A. & Solano, F. (2001). Índices físico-químicos de calidad de agua: un estudio comparativo. Conferencia internacional usos múltiples del agua. p. 211-219. Disponible en <http://www.ingenieroambiental.com/4014/fisic.pdf/> Fecha de acceso: 01-15-2010.
10. Gatica, E.A.; Almeida, C.A.; Mallea, M.A.; Corigliano, M.C. & González, P. (2012). Water quality assessment, by statistical analysis, on rural and urban areas of Chocancharava River (Río Cuarto), Córdoba, Argentina. *Environ. Monit. Assessm.*, 184(12), 7257-7274.
11. Gazzaz, N.M., Yusoff, M.K., Aris, A.Z., Juair, H. & Ramli, M.F. (2012). Artificial neural network modeling on the Water Quality Index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine Pollution Bulletin*, 64(11), 2409-2420.

12. Gharibi, H., Hossein Sowlat, M., Hossein Mahvi, A., Mahmoudzadeh, H., Arabalibeik, H., Keshavarz, M., *et al.* (2012). Development of a dairy cattle drinking water quality index (DCWQI) based on fuzzy interference systems. *Ecological Indicators*, 20, 228-237.
13. Gharsallaoui, M., Benincasa, C., Ayadi, M., Perri, E., Khlif, M. & Gabsi, S. (2011). Study on the impact of wastewater irrigation on the quality of oils obtained from olives harvested by hand and from the ground and extracted at different times after the harvesting. *Sc. Horticult.*, 128, 23-29.
14. Hurley, T., Sadiq, R. & Mazumder, A. (2012). Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Indexes (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water Research*, 46, 3544-3552.
15. Ken, C. (2002). Technology, Agronomy, Results. Understanding Irrigation Water Analysis. Disponible en: http://www.fusionfert.com/itn/articles/irrigation_water_analysis.pdf/01-18-2010/ Fecha de acceso: 01-25-2010.
16. Kretschmer, N., Ribbe, L. & Gaese, H. (2002). Wastewater reuse for agriculture. *Tech. Res. Man. Dev.*, 2, 37-64.
17. Libralato, G., Ghirardini, A.V. & Francesco, A. (2010). How toxic is toxic? A proposal for wastewater toxicity hazard assessment. *Ecotoxi. Environ.*, 73(7), 1602-1611.
18. Organización Mundial de la Salud, OMS. (2006). Monitoring and Assessment of Chemical Quality Guidelines for Drinking Water Quality Training Pack. Disponible http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/dwqtraining/en/index.html. Fecha de acceso: 03-25-2011.
19. Qadir, M. & Oster, J.D. (2004). Crop and Irrigation Management Strategies for saline-sodic soils waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Sci. Tot. Environ.*, 323(1-3), 1-19.
20. Rajankar, P.N., Gulhane, S.R., Tambekar, D.H., Ramteke, D.S. & Wate, S.R. (2009). Water quality assessment of groundwater resources in Nagpur region (India) Based on WQI. *E-Jour. Chem.*, 6(3), 905-908.
21. Raschid-Sally, L., Van Der Hoek, W. & Ranamwaka, M. (2001). Wastewater Reuse in Agriculture in Vietnam: Water Management, Environment and Human Health Aspects. International Water Management Institute (IWMI) future harvest (IWMI is a future harvest center supported by CGIAR), p. 1-48. Disponible en http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/225/mod_label/intro/Working%20Paper%20-%2030.pdf. Fecha de acceso: 01-25-2010.
22. Seeboonruang, S. (2012). A Statistical assessment of the impact of land uses on surface water quality indexes. *J. Environ. Manag.*, 101, 134-142.
23. Srebotnjak, T., Carr, G., de Sherbining, A. & Rickwood, C. (2012). A global Water Quality Index and hot-deck imputation of missing data. *Ecological Indicators*, 17, 108-119.
24. Torres, P., Cruz, C.H. & Patiño, P.H. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Ingenierías*, 8(15), 79-94.
25. Wanda, E.M.M., Gulula, L.C., Gulula & Phiri, G. (2012). Determination of characteristics and drinking water quality index in Mzuzu City, Norther Malawi. *Phys. Chem. Earth.*, 50(52), 92-97.