

**EFFECTO DE LAS LLUVIAS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA
CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO EN
PERIODO 2006-2009**

ARNALDO JOSÉ BARRETO LEZAMA

CARLOS ALBERTO SEVERICHE SIERRA

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE

MANIZALES

2013

**EFFECTO DE LAS LLUVIAS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA
CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO EN
PERIODO 2006-2009**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN
CIMAD – UNIVERSIDAD DE MANIZALES**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
BIOSISTEMAS INTEGRADOS**

**DIRECTOR
ROSA ACEVEDO BARRIOS, MSc - PhD (C)**

**COINVESTIGADORES (AUTORES)
ARNALDO JOSÉ BARRETO LEZAMA
CARLOS ALBERTO SEVERICHE SIERRA**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MANIZALES**

2013

Contenido

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2. MARCO TEORICO | 12 |
| 2.1. CALIDAD DEL AGUA | 12 |
| 2.2. INDICADORES AMBIENTALES..... | 13 |
| 2.2.1. <i>Indicadores de calidad del agua</i> | 15 |
| 2.2.1.1. Indicador de calidad para la preservación de flora y fauna (ICAM _{PF}) | 16 |
| 2.2.2. <i>Pertinencia del indicador</i> | 18 |
| 2.2.3. <i>Formúla del indicador</i> | 18 |
| 2.2.4. <i>Indicador de calidad de las aguas marinas y estuarinas para la preservación de flora y fauna (ICAM_{PF})</i> | 19 |
| 2.2.5. <i>Indicador de calidad de las aguas marinas y estuarinas para la recreación, actividades náuticas y playas (ICAM_{RAP})</i> | 20 |
| 2.2.6. <i>Alternativas de cálculo del ICAM</i> | 20 |
| 2.2.6.1. Procedimiento de cálculo cuando sólo se evalúa la naturalidad del recurso..... | 21 |
| 2.2.6.2. Indicador de Calidad para la preservación de flora y fauna (ICAM _{PF}) | 21 |
| 2.2.6.3. Procedimiento de Cálculo cuando sólo se evalúa la contaminación del recurso. | 22 |
| 2.2.6.4. Procedimiento de Cálculo cuando existe información, pero es insuficiente..... | 24 |
| 2.2.7. <i>Definición de los parámetros de la fórmula</i> | 24 |
| 2.3. VARIABLES FISICOQUÍMICAS Y SANITARIAS..... | 25 |
| 2.3.1. <i>Nitritos y Nitratos</i> | 25 |
| 2.3.2. <i>Ortofosfatos</i> | 26 |
| 2.3.3. <i>Oxigeno Disuelto</i> | 26 |
| 2.3.4. <i>Sólidos Totales y Disueltos</i> | 26 |
| 2.3.5. <i>Salinidad</i> | 27 |
| 2.3.6. <i>pH</i> | 27 |
| 2.3.7. <i>Hidrocarburos Disueltos y Dispersos</i> | 27 |
| 2.3.8. <i>Cadmio</i> | 28 |
| 2.3.9. <i>Plomo</i> | 28 |
| 2.3.10. <i>Coliformes Fecales y Totales</i> | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.11. Plaguicidas Organoclorados | 29 |
| 3. OBJETIVOS | 30 |
| 3.1. OBJETIVO GENERAL..... | 30 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 30 |
| 4. METODOLOGIA | 31 |
| 4.1. ÁREA DE ESTUDIO | 31 |
| 4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO | 34 |
| 4.3. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD | 34 |
| 4.4. CALIDAD DEL AGUA Y SU RELACIÓN CON LA LLUVIA..... | 38 |
| 5. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES | 39 |
| 5.1 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA..... | 39 |
| 5.2 LA LLUVIA Y LA CALIDAD DEL AGUA | 41 |
| 5.3 CALIDAD DEL AGUA EN LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA CGSM | 44 |
| 6. RESULTADOS | 48 |
| 6.1. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS LLUVIAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO..... | 48 |
| 6.2 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CGSM Y SU RELACIÓN CON LAS ÉPOCAS DE LLUVIOSA Y SECA. | 53 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 60 |
| 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 65 |

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descriptores del indicador de la calidad de las aguas marinas y costeras de Colombia (ICAM)

Tabla 2. Abreviaturas de los parámetros alimentadores del ICAM_{PFFE}

Tabla 3. Propuesta de medidas a adoptar según la valoración del (ICAM)

Tabla 4. Parámetros utilizados para calcular el ICAM. Modificado de: decreto 1594 de 1984 y REDCAM

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructuración de la Batería de indicadores

Figura 2. Esquema de La CGSM y las Zonas de estudio

Figura 3. Procedimiento para el cálculo del (ICAM)

Figura 4. Mapa ilustrativo de las estaciones seleccionadas para el seguimiento de la pluviosidad en el área de estudio

Figura 5. Comportamiento de las precipitaciones mensuales a través de los años 2006 a 2009 en las estaciones de las flores, Pueblo viejo, aeropuerto Ernesto Cortissoz y aeropuerto Simón Bolívar

Figura 6. Esquema del comportamiento promedio de la salinidad ($‰$) para la época seca y lluviosa

Figura 7. ICAM 2006-2009 para la zona "0" en la época seca y lluviosa

Figura 8. ICAM 2006-2009 para la zona "1 y 2" en la época seca y lluviosa

Figura 9. ICAM 2006-2009 para las zonas "3 y 5" en la época seca y lluviosa

Figura 10. ICAM 2006-2009 para la zona "6" en la época seca y lluviosa

Figura 11. ICAM 2006-2009 periodo seco y lluvioso para la CGSM

RESUMEN

Se determinó el indicador ambiental de calidad de aguas marino-costeras, en la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), localizada en la costa Caribe Colombiana, durante el periodo 2006 - 2009, mediante la aplicación de un índice para preservación de flora y fauna, Los puntos de muestreo seleccionados corresponden a seis zonas hidrobiológicamente comunes, en el estudio se encontró que las precipitaciones a lo largo de los años escogidos, el mes característico para cada época seca (febrero) y lluviosa (octubre), además se relaciona el uso de los indicadores ambientales como estrategia mundial en pro de la toma de decisiones y la gestión ambiental integral, el resultado más relevante mostro que los descriptores de calidad para el estado de naturalidad del sistema estuarino está entre los rangos bueno (51 - 75) y excelente (76 - 100).

Palabras Claves: índice de calidad de aguas, sistema, estuarino.

ABSTRACT

The environmental indicator of quality of marine coastal waters was determined, in Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), located on the Caribbean coast in Colombia, during the period of 2006 to 2009, by applying an index for the preservation of flora and fauna, the sampling points selected correspond to six common hydrobiological areas, in the study were finding precipitations over the selected years, typical for each month dry season (February) and rainy season (October), also relates the use of environmental indicators as global strategy of decision making and integrated environmental management, the most relevant result showed that quality descriptors for the state of natural estuarine system is among the ranks good (51 - 75) and excellent (76-100).

Keywords: water quality index, system, estuarine.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación se enmarca dentro de la línea de investigación Biosistemas Integrados del Centro de investigaciones (CIMAD) de la Universidad de Manizales. El trabajo se ejecuta dentro de los márgenes de esta línea de investigación porque es una alternativa metodológica novedosa para la evaluación de la calidad del agua en sistemas estuarinos, su gestión y planificación ambiental integral.

Colombia dispone anualmente de 2.000 km^3 ($58 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$) de agua como escorrentía y para infiltración profunda [1]. De lo cual se consume un cerca de $3.284 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a $63.072 \text{ mm}^3/\text{año}$. Ante factores condicionantes como densidad poblacional, tipos de asentamientos, actividades productivas y sistemas tecnológicos, se presentan efectos como la desregulación de la disponibilidad espacial y temporal en la oferta hídrica, deterioro de las condiciones biológicas y fisicoquímicas del agua, conflictos intersectoriales e interterritoriales e imposibilidad de manejo integral de las cuencas [2].

De ahí que se haya presentado en las últimas décadas un creciente interés por conocer el estado de los cuerpos acuáticos y su evolución en el tiempo con el fin de encontrar estándares de juicio de “Calidad de Agua” que permitan satisfacer las demandas de uso del recurso [4].

Los cambios ecológicos en las corrientes acuáticas, por acciones antrópicas o por fenómenos naturales, alteran por tanto, la estructura las características fisicoquímicas [5]. Además de las precipitaciones que se presenten en un cuerpo de agua determinado, en nuestro caso el sistema estudiado, la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), sistema lagunar estuarino ubicado en la zona costera del departamento del

Magdalena. Se caracteriza hidrológicamente por la descarga del Río Magdalena al complejo Pajarales (CP), y el drenaje de los ríos Fundación, Aracataca y Sevilla (vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta) a la Ciénaga Grande; colinda dinámicamente al norte con el golfo de Salamanca en el mar Caribe. Este sistema presenta seis zonas que muestran comportamientos hidrobiológicos comunes, factor tenido en cuenta en la definición de la red de estaciones para establecer el efecto de las épocas lluviosa y seca sobre la calidad del agua en este sistema en un periodo de cuatro años 2006-2009, mediante un indicador de calidad de agua con énfasis en la preservación de flora y fauna [6].

En la calidad de las aguas, durante estudios se ha observado que la reapertura de los canales ha tenido un efecto significativo favorable en la dinámica del ecosistema, influyendo en la calidad de las mismas. Igualmente, la contaminación y la productividad existentes en el ecosistema influyen en la dinámica de los nutrientes (fosfatos y nitrógeno), convirtiéndolos en posibles tóxicos en el sistema [9]; las épocas lluviosa y seca al igual que los fenómenos climáticos el niño y la niña son de suma importancia para el área de influencia de la Ciénaga Grande de Santa Marta, ya que modifica el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del agua, el manglar y el recurso pesquero, alterando el equilibrio y protección de la dinámica de la ciénaga así como el mantenimiento de las actividades productivas de sus habitantes [10], el cuestionamiento investigativo de este trabajo se centro en si ¿de qué manera la calidad del agua se ve afectada por efecto de las épocas lluviosa y seca de la CGSM?.

Se evaluó el efecto de las épocas lluviosa y seca sobre la calidad del agua en la Ciénaga Grande de Santa Marta, durante el periodo 4 años comprendido a partir de 2006 hasta 2009, aplicando un índice de calidad de agua con el fin de realizar un seguimiento cuantitativo y dar evidencia que sirva para contribuir a la preservación de flora y fauna en este importante sistema lagunar.

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) tiene asentamientos de once municipios del departamento del Magdalena, que derivan su sustento de forma directa o indirecta de los recursos que provee este ecosistema, además la importancia ecológica de la región, declarada en 1998 sitio RAMSAR que es la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, que alberga dos áreas protegidas núcleo de la reserva de biósfera (UNESCO); el Vía Parque Isla de Salamanca (VIPIS) y el Santuario de flora y fauna CGSM (SFFCGSM).

A nivel de Latinoamérica se han desarrollado estudios que buscan relacionar las variaciones temporales y espaciales con la calidad de agua de diferentes cuerpos de aguas de México, Costa Rica y Brasil [17], [18], [19]. En nuestro país se han hecho determinaciones y caracterizaciones de calidad de agua en varios sistemas lagunares y cuyos resultados son relacionados con épocas de sequía y lluvia, que en consecuencia evidencian el efecto de las precipitaciones características en cada estudio, teniendo como características comunes la baja de la salinidad por un periodo intenso de lluvias y su ascenso en periodo seco el aumento de materia orgánica y nutrientes en periodos de lluvia entre otras [20], [21], [22]. Debido a la gran importancia se hace necesario desarrollar esta investigación para guardar relación entre las variables de lluvia y la calidad del agua del sistema. El trabajo se desarrolla con información secundaria, no se pretendió explicar el fundamento matemático y analítico de los indicadores, lo que se persiguió fue la utilidad de su aplicación.

2. MARCO TEORICO

2.1. Calidad del agua

Se refiere a la composición del agua en la medida en que esta es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas. Como tal, es un término neutral que no puede ser clasificado como bueno o malo sin hacer referencia al uso para el cual el agua es destinada. De acuerdo con lo anterior, tanto los criterios como los estándares y objetivos de calidad de agua variarán dependiendo de si se trata de agua para consumo humano (agua potable), para uso agrícola o industrial, para recreación, para mantener la calidad ambiental, etc. [22].

Los límites tolerables de las diversas sustancias contenidas en el agua son normadas por la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.), la Organización Panamericana de la Salud (O.P.S.), y por los gobiernos nacionales, pudiendo variar ligeramente de uno a otro [24].

Se entiende por uso del agua para preservación de flora y fauna, su empleo en actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres y de sus ecosistemas asociados, sin causar alteraciones sensibles en ellos, o para actividades que permitan la reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies hidrobiológicas en cualquiera de sus formas, tal como en los casos de pesca y acuicultura [25].

Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna, en aguas dulces, frías o cálidas y en aguas marinas o estuarias se detallan en Decreto No. 1594 Del 26 De Junio De 1984 Republica De Colombia Ministerio De Agricultura [26].

2.2. Indicadores ambientales

Son aquellos que se refieren a las condiciones finales del medio, cuyo objetivo es informar sobre el estado del medio ambiente y su evolución espacio temporal [27], El término "indicador" se remonta al verbo latín *indicare*, en el sentido de revelar, señalar, anunciar, hacer de conocimiento público, estimar o poner precio a algo. Indicadores de la información sobre el progreso hacia los objetivos sociales, tales como el desarrollo sostenible. Sin embargo, su propósito puede ser más simple como las manecillas en un reloj para indicar el tiempo [28].

Los indicadores son señales, signos, manifestaciones, muestras o marcas de algún suceso, acontecimiento o proceso; que ponen en evidencia la magnitud o intensidad de un problema o el grado de impacto alcanzado [11]. En la política pública, los indicadores simples y sintéticos juegan un papel importante porque ayudan a construir percepción pública de problemas complejos [29], [14]. Cada vez más, los indicadores están siendo usados para promover descripciones claras de la situación actual o condición de un recurso, así como también para medir los cambios y predecir respuestas. Los indicadores son datos estadísticos o medidas que se refieren a una condición, cambio de calidad o cambio de estado; sin embargo, se debe hacer una distinción entre indicadores y otros tipos de datos estadísticos [29]. Teniendo en cuenta, que la medida de algunos eventos produce datos básicos que al ser procesados se publican como datos estadísticos, los cuales pueden ser indicadores si tienen un significado especial y están ligados a una aplicación específica, así mismo, si el

número de indicadores se reduce por medio de agregaciones son llamados índices o indicadores sintéticos. La literatura reporta varias iniciativas sobre el tema de indicadores que se clasifican de acuerdo a su alcance y enfoque metodológico. El alcance se refiere al ámbito geopolítico en donde cobra sentido la propuesta individual de indicadores, y no al arreglo nacional o transnacional de cooperación que impulsa la iniciativa. El enfoque metodológico implica: el enfoque sistémico desde lo ambiental y de desarrollo sostenible [12]. Los índices son una herramienta cuantitativa que simplifica a través de modelos matemáticos los atributos y pesos de múltiples variables, con la intención de proporcionar una explicación más amplia de un recurso o el atributo a evaluar y gestionar [30], [13]. La selección del conjunto de indicadores apropiados para integrar el indicador sintético no es una tarea fácil, dado que demanda el entendimiento de cómo funciona el sistema o fenómeno que se quiere explicar, y esto no siempre es posible cuando se trabaja con el medio ambiente [31]. Por tanto, la selección de indicadores obedece no sólo a la interpretación del investigador de una realidad compleja, sino también de la disponibilidad de información.

El sistema más conocido de indicadores y utilizado a nivel europeo, es el modelo PER (Presión-Estado-Respuesta) introducido por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), en su estructura inicial más simple y los modelos posteriormente desarrollados: FER: Fuerza conductora-Estado-Respuesta y FPEIR: Fuerza conductora- Presión-Estado-Impacto-Respuesta [32]. Donde, la presión, es el factor causante que se refiere a la fuerza ejercida por las actividades humanas y su impacto sobre el estado de la calidad del ambiente. El estado caracteriza el tipo, el grado, la extensión espacial y la tasa de cambio de algún componente del ambiente como la vegetación, los suelos o el agua y la respuesta identifica los esfuerzos hechos por los usuarios del ambiente y los gobiernos para remediar cualquier cambio degradante [23]. Los sistemas de indicadores han sido diseñados en torno a la integración de diversos aspectos, como: preocupación o

interés ambiental, áreas o sistemas ecológicos, sub-áreas y variables asociadas en su conjunto o por separado y a distintas escalas.

2.2.1. Indicadores de calidad del agua

15

Los indicadores de calidad de Aguas son usados por la gran mayoría de países en el mundo sobre toso aquellos que poseen relación con cuerpos de agua. Sin embargo, la cuantificación científica resulta importante y esta es una estrategia básica en el desarrollo de los cimientos de la ciencia para el manejo de los recursos hídricos [33]. El término del manejo óptimo de los recursos requiere estándares predefinidos de calidad integral de agua, como componente de los criterios de optimización [34]. El Indicador de Calidad de Aguas Marinas (ICAM) es un instrumento de referencia utilizado para evaluar la calidad fisicoquímica y sanitaria de las aguas marinas y costeras del país, que se basa en la información disponible sobre los diversos parámetros que se recopilan o han recopilado en bases de datos ó sistemas de información geográfica (Tabla 1). Está definido como un Indicador Ambiental según el artículo 2 de la resolución 0643 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, sus resultados están orientados a monitorear los cambios en la calidad de recursos naturales y el medio ambiente para determinar el efecto de las acciones antrópicas o naturales sobre estos recursos. El indicador va de cero a cien (porcentaje), que según el rango numérico, representa un concepto de calidad con cuatro opciones (*excelente, bueno, regular o malo*) [35]; [37].

Tabla 1. Descriptores del Indicador de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (ICAM) [35].

| No | Descriptor | Rango de Representación Numérica del Indicador ICAM % |
|----|------------|---|
| 1 | Malo | 0 - 25 |

| | | |
|----------|------------------|-----------------|
| 2 | Regular | 26 - 50 |
| 3 | Bueno | 51 - 75 |
| 4 | Excelente | 76 - 100 |

El Indicador de Calidad Ambiental de las Aguas Marinas y Estuarinas para la Preservación de Flora y Fauna –ICAM_{PFF}. Representa el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas, que describen el estado de un cuerpo de agua marino o estuarino con relación a las condiciones ambientales que propician la preservación de la flora y la fauna.

2.2.1.1. Indicador de calidad para la preservación de flora y fauna (ICAM_{PFF})

El indicador de con el cual determinamos la calidad para la preservación de flora y fauna se expresa de la siguiente manera,

$$ICAM = \sum (Q_{fq} * F_i) \quad (1)$$

Donde en el ICAM (Q_{fq} : fisicoquímicos) Y F_i es el peso específico asignado a cada parámetro, según las ecuaciones para cada indicador que sólo evalúa el grado de naturalidad del agua en particular, importancia en la ecuación y ponderado entre cero y uno. Finalmente el ICA de la ecuación (1) es un número entre cero y cien que estima la calidad en función del uso y tipo de agua y cuya calificación obtenida de las curvas de funcionamiento oscila entre cero y cien (0 y 100) [36].

En aguas estuarinas es,

$$ICAM_{PFFE} = \{(0.21) OD + (0.18) PO_4 + (0.17) Ni + (0.16) SAL + (0.15) pH + (0.13) SST\} \quad (2) \quad (\text{ver Tabla 2})$$

Tabla 2. Abreviaturas de los parámetros alimentadores del ICAM_{PFFE}.

| Abreviatura | Parámetro | Unidad |
|-----------------|-----------------------------|--------------|
| OD | Oxígeno Disuelto | mg/L |
| PO ₄ | Orto fosfatos | µg/L |
| Ni | Nitritos + Nitratos | µg/L |
| SAL | Salinidad | ‰ |
| pH | Potencial de Hidrogeno | Unidad de pH |
| SST | Sólidos Suspendidos Totales | mg/L |

Los indicadores poseen definiciones según el uso del recurso (preservación de flora y fauna y actividades recreativas, náuticas y pesqueras) y la condición natural del agua (marinas y estuarinas) como se puede observar en la Figura 1

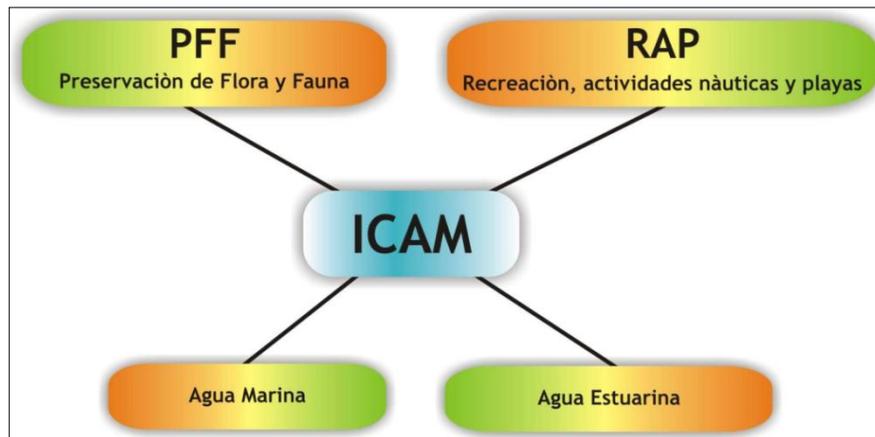


Figura 1. Estructuración de la Batería de indicadores.

El indicador de calidad ambiental de las aguas marinas y estuarinas para la preservación de flora y fauna –ICAM_{PFF}. Representa el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas, que describen el estado de un cuerpo de agua marino o estuarino con relación a las condiciones ambientales que propician la preservación de la flora y la fauna. El Indicador de Calidad Ambiental de las Aguas Marinas y Estuarinas para la Recreación, Actividades náuticas y Playas –

ICAM_{RAP}. Representa el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas, que describen el estado de un cuerpo de agua marino o estuarino con relación a las condiciones ambientales que propician un ambiente saludable para la recreación, actividades náuticas y playas. Dentro de este indicador juega un papel muy importante el índice de microorganismos de origen fecal en una masa de agua marina o costera que evalúa la calidad microbiológica del agua y representa el riesgo sanitario que propicia el uso de un cuerpo de agua para la recreación, actividades náuticas y playas. [37].

2.2.2. Pertinencia del indicador

El ICAM define las condiciones de calidad de una zona determinada con la finalidad de establecer el grado de contaminación. Funciona de una manera sencilla y sus resultados pueden ser puntuales hasta un ámbito amplio, además de su fácil manejo y resultados útiles de forma inmediata. El indicador por sí solo no tiene un gran alcance, pero si es un fundamento que puede utilizarse para la aplicación e implementación de medidas que conlleven al mejoramiento de la calidad de las zonas marinas y costeras afectadas.

2.2.3. Formúla del indicador

El indicador es adimensional ya que carece una magnitud física asociada es decir que no tienen unidades, el algoritmo general del ICAM se resume en la Ecuación 3, que incluye sumatorias separadas de los módulos de parámetros fisicoquímicos y contaminantes. Dentro de los bloques sumados, se tiene una calificación de cada parámetro, multiplicada por un factor (Fi) que pondera la importancia de cada uno de los parámetros [17].

$$ICAM = \sum_{i=1}^n (Q_{fq} \times F_i) - \sum_{i=1}^n (Q_{ct} \times F_i)$$

Ecuación (3)

Donde en el ICAM (Q_{fq} : fisicoquímicos y Q_{ct} : contaminantes) y cuya calificación obtenida de las curvas de funcionamiento oscila entre cero y cien (0 y 100). F_i es el peso específico asignado a cada parámetro, según su importancia en la ecuación y ponderado entre cero y uno. Finalmente el ICA de la ecuación 3 es un número entre cero y cien que estima la calidad en función del uso y tipo de agua [36].

2.2.4. Indicador de calidad de las aguas marinas y estuarinas para la preservación de flora y fauna (ICAM_{PFF}).

En aguas marinas:

Ecuación 4.

$$ICAMPFFM = [(0.21)OD + (0.18)SST + (0.17)PO_4 + (0.16)NI + (0.15)pH + (0.13)SAL] - [(0.25)HDD + (0.22)CFS + (0.19)CTT + (0.17)OCT + (0.17)MET]$$

En aguas estuarinas:

Ecuación 5.

$$ICAMPFFE = [(0.21)OD + (0.18)PO_4 + (0.17)NI + (0.16)SAL + (0.15)pH + (0.13)SST] - [(0.24)CTT + (0.23)CFS + (0.19)HDD + (0.18)OCT + (0.18)MET]$$

2.2.5. Indicador de calidad de las aguas marinas y estuarinas para la recreación, actividades náuticas y playas ($ICAM_{RAP}$)

En aguas marinas:

Ecuación 6

$$ICAM_{RAPM} = [(0.20) SST + (0.18) OD + (0.17) SAL + (0.16) pH + (0.15) PO_4 + (0.14) NI] - [(0.25) CFS + (0.23) CTT + (0.19) HDD + (0.17) OCT + (0.16) MET]$$

En aguas estuarinas:

Ecuación 7.

$$ICAM_{RAPE} = [(0.21) SST + (0.19) OD + (0.17) PO_4 + (0.16) NI + (0.14) SAL + (0.13) pH] - [(0.26) CTT + (0.21) CFS + (0.20) HDD + (0.17) OCT + (0.16) MET]$$

2.2.6. Alternativas de cálculo del ICAM.

Para calcular el ICAM no debe existir ausencia de datos, ya que esto desvía el contexto de la ecuación y los resultados obtenidos pueden ser no del todo confiables. Sin embargo, se ha venido trabajando en alternativas de cálculo, pero no es muy recomendable si queremos evaluar la calidad de un cuerpo de agua marino y costero; tanto en su componente de naturalidad como de intervención antrópicas [36].

Tabla 3. Propuesta de medidas a adoptar según la valoración del (ICAM). Modificado de Marín et al., 2001. Valores indicativos del grado de contaminación de las aguas marinas colombianas. Escala conceptual y tabla de valores.

| Valoración | Color | Nivel de riesgo | Medida a adoptar | Frecuencia |
|--------------------------|----------|-----------------|--|---|
| Excelente- Adecuado | Verde | No hay | Caracterización Diagnostico Verificación | Anual |
| Bueno - Satisfactorio | Amarillo | Bajo | Monitoreo Evaluación: Físico-químicos y Tóxicos | Trimestral Semestral |
| Regular - Deficiente | Naranja | Medio | Monitoreo /Bioensayos/ Medidas de Control y vigilancia. Evaluación: Físico-químicos y Tóxicos Plan de contingencia | Mensual Trimestral |
| Malo - Inadecuado | Rojo | Alto | Monitoreo y Seguimiento /Bioensayos/ Evaluación: Físico-químicos y Tóxicos /Plan de contingencia/ Aplicación de medidas de choques | Mensual Trimestral Semestral Anual |

2.2.6.1. Procedimiento de cálculo cuando sólo se evalúa la naturalidad del recurso.

Si la calidad del agua es el conjunto de características propias del agua y el indicador tiene dos enfoques ajustados al concepto de calidad evaluando su grado de naturalidad y las alteraciones (contaminación) producto de actividades antrópicas. En situaciones particulares de no contar con la información suficiente, se propone asumir el cálculo del indicador en uno de sus componentes principales (parámetros naturales y contaminantes), ver Ecuación 8 [36].

2.2.6.2. Indicador de Calidad para la preservación de flora y fauna (ICAM_{PPF})

En aguas marinas:

Ecuación 8.

$$\text{ICAMPFFM} = [(0.21) \text{OD} + (0.18) \text{SST} + (0.17) \text{PO}_4 + (0.16) \text{NI} + (0.15) \text{pH} + (0.13) \text{SAL}]$$

En aguas estuarinas:

Ecuación 9.

$$\text{ICAMPFFE} = [(0.21) \text{ OD} + (0.18) \text{ PO}_4 + (0.17) \text{ NI} + (0.16) \text{ SAL} + (0.15) \text{ pH} + (0.13) \text{ SST}]$$

Indicador de Calidad para la Recreación, Actividades náuticas y Playas (ICAMRAP)

En aguas marinas:

Ecuación 10.

$$\text{ICAMRAPM} = [(0.20) \text{ SST} + (0.18) \text{ OD} + (0.17) \text{ SAL} + (0.16) \text{ pH} + (0.15) \text{ PO}_4 + (0.14) \text{ NI}]$$

En aguas estuarinas:

Ecuación 11.

$$\text{ICAMRAPE} = [(0.21) \text{ SST} + (0.19) \text{ OD} + (0.17) \text{ PO}_4 + (0.16) \text{ NI} + (0.14) \text{ SAL} + (0.13) \text{ pH}]$$

2.2.6.3. Procedimiento de Cálculo cuando sólo se evalúa la contaminación del recurso.

En la eventualidad de la insuficiencia o ausencia de datos de parámetros fisicoquímicos se asumirá sólo el cálculo del bloque de contaminantes Ver Ecuación

8 quedando así las ecuaciones para cada indicador que sólo evalúa el estado de intervención antrópicas que ha tenido el agua.

Indicador de Calidad para la preservación de flora y fauna **(ICAMPFF)**

23

En aguas marinas:

Ecuación 12.

$$\text{ICAMPFFM} = [(0.25) \text{HDD} + (0.22) \text{CFS} + (0.19) \text{CTT} + (0.17) \text{OCT} + (0.17) \text{MET}]$$

En aguas estuarinas:

Ecuación 13.

$$\text{ICAMPFFE} = [(0.24) \text{CTT} + (0.23) \text{CFS} + (0.19) \text{HDD} + (0.18) \text{OCT} + (0.18) \text{MET}]$$

Indicador de Calidad para la Recreación, Actividades náuticas y Playas **(ICAMRAP)**

En aguas marinas:

Ecuación 14

$$\text{ICAM}_{\text{RAPM}} = [(0.25) \text{CFS} + (0.23) \text{CTT} + (0.19) \text{HDD} + (0.17) \text{OCT} + (0.16) \text{MET}]$$

En aguas estuarinas:

Ecuación 15.

$$\text{ICAMRAPE} = [(0.26) \text{CTT} + (0.21) \text{CFS} + (0.20) \text{HDD} + (0.17) \text{OCT} + (0.16) \text{MET}]$$

2.2.6.4. Procedimiento de Cálculo cuando existe información, pero es insuficiente.

Debido a diferentes sucesos durante el monitoreo se dan casos donde no se cumple con todas las mediciones de los parámetros requeridos en el indicador, generando una ausencia de datos, que altera el indicador. Consecuentemente, se plantea una solución que pudiera contribuir a mejorar esa eventualidad. En sitios de muestreo con este inconveniente en el momento del cálculo y que tienen datos históricos en la base de datos, se les puede realizar a esos datos un tratamiento estadístico básico de manera que se conozca el valor característico del parámetro en esa área, el cual se puede evaluar por temporada climática, muestreos recientes, etc. En este caso se sugiere utilizar como dato para el cálculo el valor de la media de los últimos monitoreos y posiblemente la mediana para evitar la influencia de valores extremos. Vale decir, que son situaciones no deseables cuando se quiere evaluar integralmente un cuerpo de agua, sin embargo, por la experiencia del monitoreo se hace necesario contar con estas alternativas de cálculo [36].

2.2.7. Definición de los parámetros de la fórmula

}Los parámetros utilizados para el ICAM poseen características indicadoras de comportamiento ó eventos que alteran las condiciones naturales del agua, permiten evaluar su calidad [36]. La lista de parámetros ambientales que apuntan a la evaluación de la calidad del agua marino-costera se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Parámetros utilizados para calcular el ICAM. Modificado de: Decreto 1594 de 1984 y REDCAM.

| No | TIPO | COD | NOMBRE | UNIDAD |
|----|----------------------------|-----------------|-------------------------------------|------------|
| 1 | Físico/Químicos | NO ₂ | Nitritos | µg/L |
| 2 | Físico/Químicos | NO ₃ | Nitratos | µg/L |
| 3 | Físico/Químicos | PO ₄ | PO ₄ (Ortofosfatos) | µg/L |
| 4 | Físico/Químicos | OD | Oxígeno Disuelto | mg/L |
| 5 | Físico/Químicos | SST | Sólidos Suspendidos Totales | mg/L |
| 6 | Físico/Químicos | SAL | Salinidad | °/oo |
| 7 | Físico/Químicos | pH | pH | Unidad |
| 8 | Hidrocarburos del petróleo | HDD | Hidrocarburos disueltos y dispersos | µg/L |
| 9 | Metales Traza | Cd | Cadmio | mg/L |
| 10 | Metales Traza | Cr | Cromo | mg/L |
| 11 | Metales Traza | Pb | Plomo | mg/L |
| 12 | Microbiológicos | CFS | Coliformes Fecales | NMP/100 mL |
| 13 | Microbiológicos | CTT | Coliformes Totales | NMP/100 mL |
| 14 | Plaguicidas organoclorados | OCT | Organoclorados Totales | ng/L |

2.3. Variables fisicoquímicas y sanitarias

2.3.1. Nitritos y Nitratos.

Los nitritos son sales o ésteres del ácido nitroso (HNO₂), en los nitritos inorgánicos se encuentra el anión NO₂⁻. En la naturaleza los nitritos se forman por oxidación biológica de las aminas y del amoníaco o por reducción del nitrato en condiciones anaeróbicas. Los nitratos son sales o ésteres del ácido nítrico HNO₃, en los nitratos está presente el anión NO₃⁻. El nitrógeno en estado de oxidación +V se encuentra en el centro de un triángulo formado por los tres oxígenos. La estructura es estabilizada por efectos mesoméricos [36].

2.3.2. Ortofosfatos

Son los fosfatos más ampliamente distribuidos en la naturaleza, se encuentran en forma de apatita. Su presencia es fundamental en los organismos vivos y puede contribuir a la eutrofización de cuerpos de agua e indica descargas significativas de desechos orgánicos o abonos agrícolas [37].

2.3.3. Oxígeno Disuelto

Es la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua. La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura: a mayor temperatura menos oxígeno se disuelve. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Cuando los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir, el agua presenta un alto contenido de materia orgánica y los procesos de descomposición disminuyen el oxígeno disuelto [37].

2.3.4. Sólidos Totales y Disueltos

Son la materia sólida suspendida o disuelta en el agua o en sus desechos. Los sólidos pueden afectar adversamente la calidad de las aguas en varias formas: aguas con alto contenido de sólidos son menos agradables para el gusto humano y pueden inducir a una reacción fisiológica desfavorable en el consumidor. Las aguas altamente mineralizadas son inútiles para muchas aplicaciones industriales; y las que poseen altos contenidos de sólidos disueltos pueden ser estéticamente insatisfactoria para propósitos como el baño [37].

2.3.5. Salinidad

Expresión porcentual o en peso por unidad de volumen de las sales disueltas en el agua. Martín Knudsen en 1902 midió la salinidad en función de la cantidad de cloro presente en el agua de mar a lo que le dio el nombre de Clorinidad, con la idea de simplificar la determinación original que implicaban muchas dificultades. La salinidad es un factor ecológico de alta importancia, influenciando mucho la presencia y los tipos de organismos que viven en esos cuerpos de agua, dependiendo de las características del sistema acuático puede ser una variante relevante, como sucede en los ecosistemas estuarinos, en que los cambios de salinidad pueden condicionar la evolución de los recursos naturales asociados al agua [37].

2.3.6. pH

El pH es una medida que indica la acidez del agua. El rango varía de 0 a 14, siendo 7 el rango promedio (rango neutral). Un pH menor a 7 indica acidez, mientras que un pH mayor a 7, indica un rango básico. Por definición, el pH es en realidad una medición de la cantidad relativa de iones de hidrógeno e hidróxido en el agua. Agua que contenga más iones de hidrógeno tiene una acidez mayor, mientras que agua que contiene más iones de hidróxido indica un rango básico [37].

2.3.7. Hidrocarburos Disueltos y Dispersos

Los hidrocarburos son compuestos bioquímicos formados únicamente por carbono e hidrógeno. Consisten en un armazón de carbono al que se unen átomos de hidrógeno. Forman el esqueleto de la materia orgánica. Hidrocarburos extraídos

directamente de formaciones geológicas en estado líquido se conocen comúnmente con el nombre de petróleo, mientras que a los que se encuentran en estado gaseoso se les conoce como gas natural. Los hidrocarburos constituyen una actividad económica de primera importancia, pues forman parte de los principales combustibles fósiles (petróleo y gas natural), así como de todo tipo de plásticos, ceras y lubricantes [37].

2.3.8. Cadmio

El cadmio es un elemento químico de número atómico 48 situado en el grupo 12 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Cd. Es un metal pesado, blanco azulado, relativamente poco abundante. Es uno de los metales más tóxicos, aunque podría ser un elemento químico esencial, necesario en muy pequeñas cantidades, pero esto no está claro. El cadmio es un metal pesado que produce efectos tóxicos en los organismos vivos, aun en concentraciones muy pequeñas [37].

2.3.9. Plomo

El plomo es un elemento químico de la tabla periódica cuyo símbolo es Pb y su número atómico es 82 según la tabla actual, ya que no formaba parte en la tabla de Mendeleiev. Este químico no lo reconocía como un elemento metálico común por su gran elasticidad molecular. El Plomo ocurre de forma natural en el ambiente, pero las mayores concentraciones que son encontradas en el ambiente son el resultado de las actividades humanas [37].

2.3.10. Coliformes Fecales y Totales

Coliforme significa con forma de coli, refiriéndose a la bacteria principal del grupo, la *Escherichia coli*, descubierta por el bacteriólogo alemán Theodor Von Escherich en 1860. Von Escherich la bautizó como *bacterium coli* ("bacteria del intestino", del griego *κολον*, *kolon*, "intestino"). Con posterioridad, la microbiología sistemática nombraría el género *Escherichia* en honor a su descubridor. Asimismo, su número en el agua es proporcional al grado de contaminación fecal; mientras más coliformes se aíslan del agua, mayor es la gravedad de la descarga de heces. El control de la calidad sanitaria del agua marina y costera se efectúa a través de los análisis de los indicadores de contaminación fecal que establece la normativa colombiana (Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Agricultura) y los valores guía de la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2003) que corresponden a los siguientes microorganismos: Coliformes totales (CTT), Coliformes fecales (CFS) y Enterococos fecales (EFE) [37].

2.3.11. Plaguicidas Organoclorados

Los pesticidas o plaguicidas son sustancias químicas destinadas a matar, repeler, atraer, regular o interrumpir el crecimiento de plagas (aquellos organismos nocivos que transmiten enfermedades, compiten por alimentos y/o dañan bienes económicos y culturales) en su sentido más amplio [37]. Los organoclorados son un ejemplo de persistencia ambiental pues permanecen en los suelos sin degradación significativa hasta 30 años después de aplicados. Esa permanencia favorece la incorporación a las cadenas tróficas, la acumulación en los tejidos grasos humanos y animales y la biomagnificación. La contaminación de los cursos de agua se produce en forma directa por la aplicación de pesticidas en las aguas, por lavado de envases o equipos y por descarga de remanentes y residuos [37].

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

30

Evaluar el efecto de las épocas lluviosa y seca sobre la calidad del agua en la Ciénaga Grande de Santa Marta, aplicando un índice de calidad para preservación de flora y fauna.

3.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la variación temporal y espacial de lluvias en el área de influencia de la Ciénaga Grande de Santa Marta en el periodo 2006-2009, utilizando un análisis estadístico simple.
2. Evaluar la calidad del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta utilizando un índice de calidad para relacionarlo con épocas secas y lluviosas.

4. METODOLOGIA

La investigación es de tipo descriptivo y se desarrolla con información secundaria ya existente de resultados del sistema de información del proyecto Ciénaga Grande de Santa Marta CGSM. Se cuenta con el apoyo del INVEMAR - Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Para evaluar la calidad del agua se utiliza el índice de calidad del agua para preservación de flora y fauna (ICAM_{PPF}) [37], se seleccionaron datos de épocas lluviosa y seca periodo (2006-2009). El área de seguimiento, se aborda mediante una red de estaciones agrupadas en seis zonas que representan condiciones hidrobiológicas comunes. El desarrollo de presente trabajo se apoya en fuentes de información de entidades y documentos base, contenidos en DANE, INVEMAR, Corporación Autónoma Regional del Magdalena CORPAMAG, IDEAM; Planes de manejo ambiental, Estudios ambientales; Normatividad colombiana vigente PNAOCI, datos de lluvias de los Aeropuertos Simón Bolívar de Santa Marta y Ernesto Cortissoz de la ciudad de Barranquilla, artículos científicos, bases de datos y sistemas de información geográfica entre otros. La frecuencia de muestreo para cada grupo de variables fue: 1) *Mensual*, las variables fisicoquímicas *in situ* (temperatura, pH, salinidad y oxígeno disuelto). 2) *bimensual*, las concentraciones de nutrientes (nitritos, nitratos, amonio, ortofosfatos) [38].

4.1. Área de estudio

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) forma parte de uno de los ecosistemas lagunares-estuarinos más importante de la cuenca del Caribe, tanto desde el punto de vista ecológico como económico, localizado en la costa Caribe Colombiana, entre los 10°43' y los 11°00' latitud Norte y los 74°16' y 74°38' longitud Oeste, e incluye un área aproximada de 3812 km², de los cuales 757 km² corresponden a cuerpos de agua (Figura 2). Es caracterizada por presentar bajas precipitaciones (400 mm.año⁻¹), alta evapotranspiración (1431 mm.año⁻¹) y eventos como El Niño y la Niña, que sumados

originaron un marcado incremento en la salinidad de aguas y suelos de manglar >100 unidades, el clima de la zona es árido-tropical, con 6-7 meses secos al año y un déficit hídrico de 1031 mm.año⁻¹. Se presentan dos épocas climáticas, un período seco de diciembre a abril y uno lluvioso de mayo a noviembre, las lluvias más intensas ocurren entre septiembre y diciembre. La conexión con el mar es en Boca de la Barra, que se abre a través de la Isla Salamanca, con un ancho aproximado de 280 m y la entrada de agua dulce es a través de las desembocaduras de los ríos provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta (Aracataca, Fundación y Sevilla) por el oriente y suroriente; con un mayor aporte, aguas del río Magdalena [8]., la Ciénaga limita con el complejo de ciénagas y canales denominado Pajarales, con el cual se comunica directamente a través de los caños Grande, Clarín y Tambor. Así mismo, el complejo Pajarales se encuentra comunicado con el Río Magdalena por una serie de caños [23], [6].

Teniendo en cuenta el informe técnico final, Monitoreo CGSM 1999 - 2002, elaborado por el INVEMAR, donde se establece que a partir de la puesta en marcha de las obras hidráulicas, consistentes en la construcción de canales de comunicación del río Magdalena a través de los caños Clarín, Aguas Negras y Renegado (1994-1998) al Complejo de Pajarales (CP) primero, y luego a la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), el sistema CGSM-CP experimentó un cambio notable en el comportamiento espacial y temporal de las variables físicas, químicas, biológicas, así como de los contaminantes orgánicos, metálicos y microbiológicos. Dentro de estas variables, la salinidad ha tenido una marcada influencia en la reestructuración de la comunidad viva, incluidos los recursos pesqueros. La afluencia de agua dulce proveniente del río Magdalena a través de los caños que lo comunican con el complejo lagunar, ha traído como resultado la existencia de tres estratos, más o menos definidos, a) el estuarino, la CGSM, medio de aguas salobres, sometida a cambios estacionales de salinidad, hábitat de las especies tradicionales eurihalinas; b) el plano de inundación, en el área influida por la entrada de agua por los caños, ciénaga la Redonda y Salamanca Occidental; áreas al sur-occidente, como el

Santuario de Flora Fauna, sometidas al régimen fluvial de inundación y sequía, con especies de peces dulceacuícolas migratorias y residentes, aunque estenohalinas; y c) un ecotono entre los anteriores, el complejo de Pajarales, que temporalmente se asimila a los otros dos estratos en la salinidad de sus aguas y la presencia de especies dulceacuícolas y/o estuarinas (esteno- y eurihalinas, respectivamente) [55]. En concordancia a lo anterior, en el plan de manejo para el sitio RAMSAR y reserva de la biosfera, sistema delta estuarino del río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta, desarrollado por la República de Colombia y su Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en asocio con la corporación autónoma regional del Magdalena (CORPAMAG), el Instituto de investigaciones Marinas y Costeras, «José Benito Vives De Andreis, INVEMAR», en 2004; la CGSM, como se muestra en la Figura 2, esta agrupada en seis zonas: zona 0, comprende las estaciones que poseen características típicas marinas (la Barra y las del Mar Caribe); zona 1, influencia de los ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta -SNSM; zona 2, espejo de agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM); zona 3, ciénagas del Complejo Pajarales -CP; zona 5, influencia plena del río Magdalena con características propias de las descargas de aguas continentales; y zona 6, ciénagas de Salamanca occidental (CSO) [56].

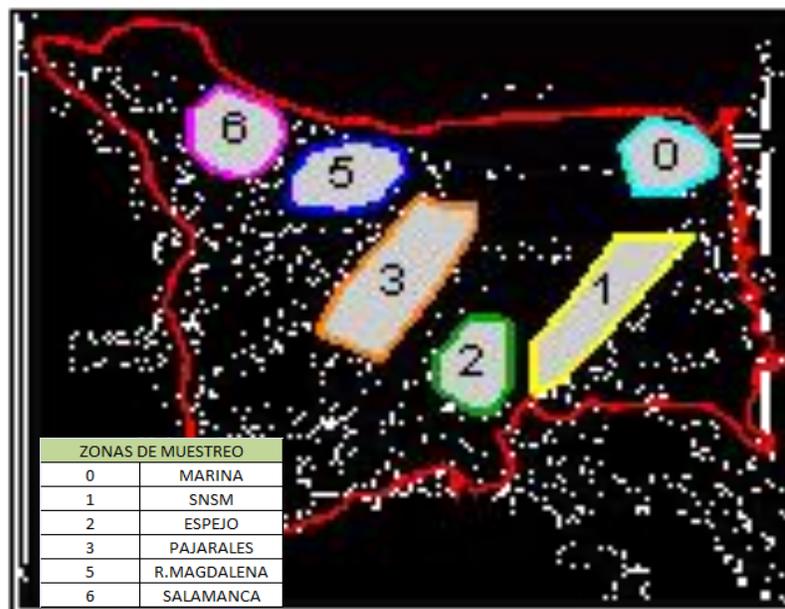


Figura 2. Esquema de La CGSM y las Zonas de estudio [41].

4.2 Análisis Estadístico

Se realiza una evaluación de la variación temporal y espacial de las lluvias en el área delimitada de la Ciénaga Grande de Santa Marta en el periodo 2006-2009, las estaciones se escogieron teniendo en cuenta la proximidad y representatividad al área de estudio, las cuales son: aeropuerto Simón Bolívar - Santa Marta, Aeropuerto Ernesto Cortissoz - Barranquilla, Las Flores - Barranquilla, Pueblo Viejo - Tasajera, el primero de los gráficos desarrollados fue el mapa ilustrativo de las estaciones seccionadas para el seguimiento de la pluviosidad, enmarcadas a el área de estudio, los datos obtenidos de la información suministrada por las estaciones meteorológicas anteriormente mencionadas se tabularon y analizaron por medio de programa estadístico Excel y la metodología para la construcción de un grafico de barra agrupado que permitió la comparación de la pluviometría para cada uno de los años versus la cantidad de precipitación generada, relacionando al mismo tiempo todos los meses del año.

34

La evaluación de la calidad de agua de la CGSM y su relación con las con las épocas de lluviosa y Seca, se determino por medio de un análisis estadístico simple, a través de la elaboración de un grafico horizontal agrupado en el cual se tabulo y analizo el mes característico seco y lluvioso con referencia al valor del índice de calidad (ICAM), resultado que tuvo en cuenta un porcentaje de error del 5%, provisto por el grado de confiabilidad de los valores obtenidos.

4.3. Determinación Del Índice De Calidad

EL indicador de calidad de las aguas marinas y estuarinas para la preservación de flora y fauna –**ICAM_{PPF}**, en relación a los indicadores de la calidad de las aguas

marinas y costeras [31]. Seguidamente se muestra la metodología de cálculo, La batería de indicadores de calidad del agua marina y costera para Colombia se puede desarrollar bajo el siguiente diagrama de flujo, donde se muestra el proceso general (ver Figura 3).

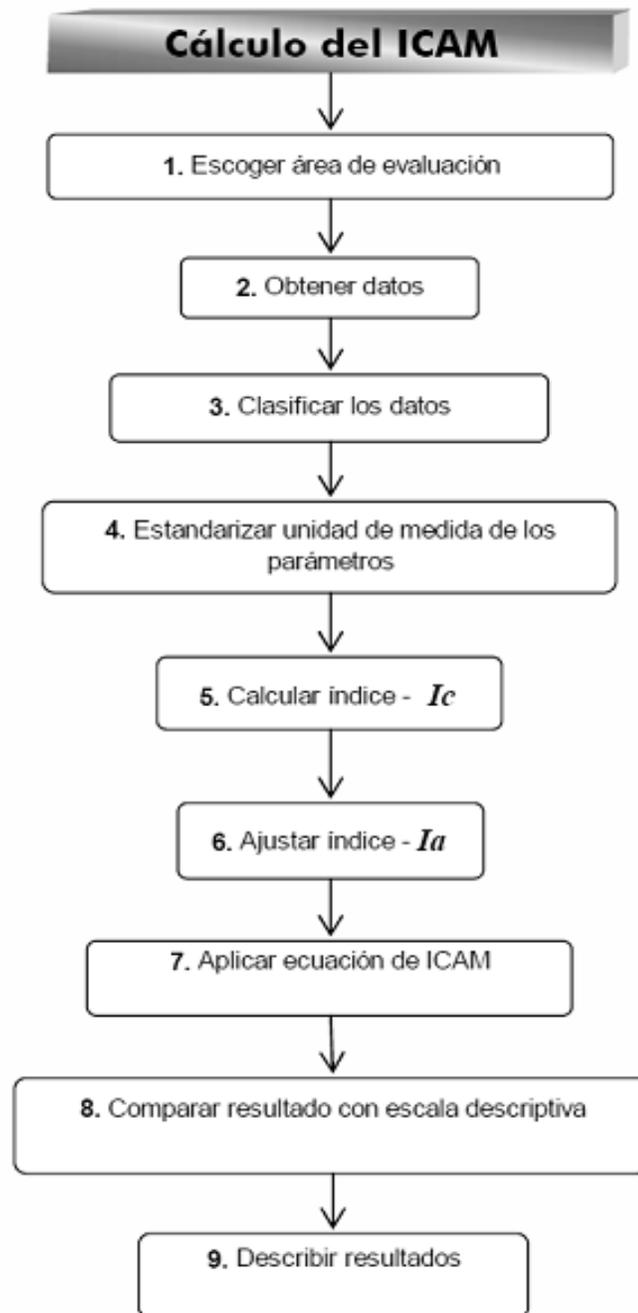


Figura 3. Procedimiento para el cálculo del (ICAM).

Procedimiento en detalle:

- 1. Selección del área de evaluación.** Consiste en seleccionar el área donde se pretende aplicar el indicador y el uso potencial de la misma.
- 2. Obtención datos.** Lo que se hace en esta etapa es una consulta de los datos útiles de los parámetros requeridos, conforme al nivel de agregación proyectado en el área de evaluación seleccionada.
- 3. Clasificación los datos.** Aquí se catalogan los datos arrojados por la consulta y se verifica su disponibilidad según el tipo de agua (marina o estuarina).
- 4. Estandarización los datos de los parámetros.** Es la acción de organizar y convertir los datos de los parámetros a las unidades de medida de cada parámetro, de acuerdo a las curvas de funcionamiento.
- 5. Calculo del índice – Ic.** Es aplicar la fórmula de la curva de funcionamiento de cada parámetro Ic (Índice calculado).

En la aplicación de las fórmulas en Excel debe tenerse en cuenta que las celdas vacías no se confundan con valores de cero (0); para solucionar este inconveniente se utiliza la función ESBLANCO que al aplicarla con la función del SI CONDICIONAL las celdas vacías mostrarán evidencia con el guión (“-”), facilitando la visualización del blanco. Para crear las fórmulas de los índices en la hoja Excel se utilizó en algunos casos funciones predefinidas (que ejecutan cálculos utilizando valores específicos que nos ayudan a ejecutar operaciones simples o complejas) y funciones anidadas (función que se puede utilizar como uno de los argumentos de otra función), como la función SI CONDICIONAL, devuelve un valor si la condición especificada es VERDADERA y otro valor si dicho argumento es FALSO, utilizando una prueba lógica (cualquier valor o expresión que pueda evaluarse como VERDADERO o FALSO).

Nota: En el caso de los Nitritos y Nitratos ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$), los datos de estos se deben promediar antes de calcular el índice, ya que es el promedio el que se utiliza en la fórmula.

6. Ajuste índice – Ia. Consiste en hacer concordar el índice calculado con la escala predeterminada de cero a cien (0 - 100), utilizando una ecuación con funciones condicionales de Excel. En la fórmula del índice ajustado (Ia), no deben ajustarse los valores mayores y cercanos a cero (0) al valor cero, ya que seguido viene la multiplicación por el factor de ponderación y esto incurriría en un mayor porcentaje de error, sólo igualar a cero los índices calculados con valores menores a cero o negativos (-).

37

Nota: En el caso de los metales pesados (Cadmio, Cromo y Plomo) lo que se promedia es el valor del índice calculado de cada metal y con ese promedio de Ic es que se obtiene el índice ajustado (Ia). Siendo coherentes con el número de metales disponibles para el cálculo.

7. Aplicación ecuación del indicador. Concordante con el tipo de agua y uso que se quiera evaluar se escoge alguna de las ecuaciones (numeral 1) con los algoritmos de cálculo del indicador. En cada una de las ecuaciones se utilizan los factores de ponderación (F_i) asignados para cada parámetro respectivo, afín con el tipo de agua y de uso, aplicando las funciones condicionales necesarias y sin dejar de evaluar las celdas vacías.

8. Comparación resultado con escala descriptiva. Después de obtener el resultado final del cálculo del indicador se utiliza la escala descriptiva para encasillarlo en alguno de los rangos de representación numérica (Tabla 2) y determinar el color característico de esa calidad.

9. Descripción los resultados. Siendo consecuentes con el objetivo de cálculo de los indicadores de calidad de aguas marinas y estuarinas es preciso describir los resultados obtenidos para evaluar el estado de la calidad del agua y adoptar medidas para el recurso hídrico en cuestión. En la Tabla 2, se detalla la

propuesta de medidas que se pueden adoptar concordantes con la valoración de la calidad del agua y al nivel de riesgo encontrado.

4.4. Calidad del agua y su relación con la lluvia

38

Se estima la calidad del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta utilizando el índice de la calidad de agua para relacionarlo con épocas secas y lluviosas, procediendo con el indicador de calidad ambiental de las aguas marinas y estuarinas para la preservación de flora y fauna –ICAM_{PFF} [31], representando el conjunto de características físicas, químicas y que describen el estado de un cuerpo de agua marino o estuarino con relación a las condiciones ambientales que propician la preservación de la flora y la fauna, luego de calcular el índice, el resultado es comparado con escala descriptiva y se discutió el resultado paralelamente con los comportamientos de las épocas lluviosa y seca.

5. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

Los estudios relacionados sobre indicadores ambientales, índices de calidad del agua, el efecto de las lluvias sobre ecosistemas marino costeros y sistemas estuarinos relacionados con la calidad del agua de estos, además de algunas investigaciones y estudios relacionados con nuestra área de estudio, la Ciénaga Grande de Santa Marta CGSM y que sirven de cimiento científico para el trabajo realizado, se evidencian a continuación.

39

5.1 Índice de calidad del agua

En los últimos años, los indicadores para la toma de decisiones, han tenido avances importantes en países desarrollados, en agencias internacionales y también en algunos países de Latinoamérica con iniciativas que alcanzan escalas diversas y enfoques metodológicos distintos. Algunos países están elaborando indicadores de sostenibilidad ambiental, mientras que, otros trabajan desde el enfoque de desarrollo sostenible, esto es incorporando (pero no necesariamente relacionando) las dimensiones económica, social, ambiental e institucional del desarrollo [12], [14].

Coimbra en 1996, ensayo la aplicación de un análisis nodal para la elaboración de índices bióticos para condiciones críticas, su área de estudio, el río fue perturbado por un efluente con pH alto, sulfatos, nitratos y conductividad. "verano" y las muestras de "invierno", fueron tratadas por separado. Los grupos se identificaron de sitios diferentes en la composición taxonómica por análisis cluster. El índice de diversidad en la tabla de referencia, la calidad del agua claramente discriminados, el impacto de los sitios de referencia en los dos años siguientes de estudio y se correlacionó con el primer eje de un análisis de correspondencias que también discrimina a los sitios

afectados limpios. Sugieren que el análisis nodal puede ser una técnica fiable para la identificación de los bioindicadores y la elaboración de índices bióticos [42].

En 2001 Fano y colaboradores, ensayaron un índice multiparametrico de la evaluación de la calidad ambiental (el Índice de Calidad Ecofuncional, EQI) se desarrollo a partir de datos bióticos de tres lagunas costeras italianas. Los programas de muestreo se realizaron entre 1998 y 2000, en un año base, con una frecuencia de temporada en diversos sitios en cada laguna. La razón del índice es que ciertos atributos seleccionados sobre la base de los principios establecidos de la ecología bentónica, son fundamentales para el funcionamiento del ecosistema laguna. Los atributos elegidos fueron productividad primaria, expresado como fitoplancton, biomasa de algas y fanerógamas marinas, la estructura y la productividad de la bentónicos la comunidad, expresado en la abundancia numérica, la densidad de la biomasa, el número de especies y la diversidad taxonómica de macrozoobentos; y, por último, la complejidad trófica, expresada en la diversidad funcional macrozoobentónica. El EQI está constituido por la suma de pesos atención a estos ocho atributos, cada uno transformado en una escala de calidad dimensiones 000-100. De esta manera, el uso de EQI puede derivar una serie de valores de rendimiento de una clasificación funcional de sitios dentro de una laguna o entre diferentes lagunas. El índice propuesto tiene un bajo costo, el indicador de rutina flexible y robusto de la laguna de deterioro de los ecosistemas y podría ser especialmente beneficiosa para los gestores ambientales y políticos que requieren herramientas capaces de expresar el grado de deterioro y del medio ambiente calidad de los hábitats de laguna diferentes. El proceso de desarrollo y las pruebas iniciales de EQI reportados pretenden como preliminares, y hasta de validación de este índice se lleva a cabo mediante la incorporación de los datos de una gama más amplia de entornos de laguna, advierten que el uso de este índice no es otra cosa que una forma de exploración [43].

Beamonte y colaboradores en 2010, midieron la calidad del agua utilizando un índice estocástico construido con herramientas de teoría de la probabilidad. Su gran ventaja es que da cuenta de la incertidumbre subyacente en la calidad clasificación que resulta de las variaciones en los datos de las características individuales físicas y químicas, considerando como variables aleatorias. Compararon los resultados obtenidos de la calidad del agua con este índice (el índice probabilístico, PI) y un índice clásica determinista (el índice de calidad general, GqI). También hicieron una comparación con otros índices habituales con el fin de validar el índice de PI. Para demostrar la aplicación de la PI y los índices de GqI, utilizaron información de la Confederación Hidrográfica del Júcar (España) para el período entre 1990 y 2005. el análisis mostró que se GqI correlacionó positivamente con la PI en todo el período de estudio. Debido a su alto potencial, el índice del PI utilizarse para analizar posibles cambios temporales en la calidad del agua, así como para determinar la persona influencia de cada variable en la calidad del agua. Los resultados sugieren una mejora en la calidad del agua en tiempo y que la omisión de forma individual, uno a la vez, cinco de las nueve variables de calidad de agua de la PI cálculo mejorado significativamente la calidad del agua calculado. La novedad de este trabajo es el diseño de un índice que toma en cuenta la incertidumbre inherente a los datos, y su aplicación para medir la calidad del agua desde una perspectiva general [44].

5.2 La lluvia y la calidad del agua

Son las variables ambientales las que advierten sobre los cambios y el estado de los componentes fisicoquímico, biótico o ecológico, en nuestro caso, para atender las necesidades de rehabilitación de los ecosistemas de esta región, considerado de importancia nacional, desde el año 1987 se comenzó la gestión para la recuperación de la ecorregión de la CGSM a partir de acontecimientos importantes como la presentación de un proyecto de recuperación ambiental para la Subregión, ante la Comisión Mixta Colombo-Alemana en el Departamento Nacional de Planeación por parte del Instituto de Investigaciones Marino Costeras– INVEMAR y

COLCIENCIAS. Por otro lado, el Congreso de la República, en 1988, crea por ley la “Corporación Autónoma Regional del Magdalena y de la Sierra Nevada de Santa Marta” CORPAMAG [15].

Tuchkovenko y colaboradores en 2003, describen detalladamente la estructura y calibración del bloque químico-biológico de un modelo matemático bidimensional, de un ecosistema de aguas someras. Este modelo incluye las ecuaciones de equilibrio para los componentes del ecosistema tales como: fitoplancton, bacterioplancton, zooplancton, materia orgánica muerta, fosfatos, amonio, nitritos, nitratos y oxígeno disuelto. Calculan la distribución espacial de los componentes de un ecosistema en la Ciénaga Grande de Santa Marta, para cada época de año, lluvia y sequía [45].

Aubriot y colaboradores en 2005, en la laguna de Rocha-Uruguay, analizaron la evolución de los principales parámetros físico-químicos y la clorofila a, de los últimos 16 años, con el objetivo de evaluar los cambios recientes en el sistema. Observaron un incremento de la concentración de indicadores bióticos en los últimos 6 años, conjuntamente con un aumento de seis veces la media histórica de la concentración de la clorofila a. El Nitrógeno y sus formas disueltas exhibieron una progresiva disminución, evidenciando una pérdida de nitrógeno en el sistema. Demostraron experimentalmente la limitación del crecimiento del fitoplancton por nitrógeno, así como la co-limitación por fósforo. Las causas de los cambios en el estado trófico del sistema fueron analizadas en relación con el uso de la tierra en la cuenca y al régimen hidrológico [46].

Herrera en 2006, dice que las lagunas costeras son un rasgo fisiográfico muy importante de las costas de la Península de Yucatán (México), donde se desarrollan diferentes actividades impulsadas por su productividad, atractivo escénico y biodiversidad. Sin embargo, los recursos ambientales de algunas de ellas se han

reducido a consecuencia del incremento en descargas de aguas residuales, modificaciones hidrológicas y cambios de uso de la tierra. Bajo este contexto, caracterizaron y diagnosticaron la condición de las lagunas costeras de Yucatán, para orientar las acciones de manejo. Analizaron los componentes de calidad del agua, fitoplancton y pastos marinos de 8 lagunas costeras de Yucatán. La variabilidad hidrológica la asociaron al patrón climático y es dependiente del balance entre los aportes de agua dulce vía descargas subterráneas y los marinos, por lo que las lagunas presentan condiciones desde oligohalinas (<10) hasta hiperhalinas (>40). La calidad del agua en general es buena, sin embargo, se encuentra en un nivel de riesgo otras lagunas (Chelem y Bohórquez). En respuesta a ello, en estas mismas lagunas la abundancia de especies de fitoplancton nocivo y la cobertura de pastos marinos indican que se encuentran en condiciones de eutrofización, dependiendo de la época lluviosa del año [47].

Noriega y colaboradores en 2009, muestran los resultados de series temporales en el estuario de Barra de Jangadas en el Noreste de Brasil. El estudio fue realizado durante siete días consecutivos desde una marea de sicigia a una de cuadratura, en una estación fija durante el periodo seco (enero) y lluvioso (julio), en 2001. Analizando parámetros meteorológicos (precipitación pluviométrica, evaporación, intensidad de los vientos), hidrológicos (temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto-OD y tasa de saturación, DBO5, nutrientes (NH_3 , NH_4 , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{-3} , SiO_2)), batimetría, intensidad de las corrientes y clorofila-*a*. El análisis de componentes principales (ACP), explicó el 80% de la varianza total, mostrando una relación inversa entre nutrientes y OD, salinidad y pH. Este análisis mostró una correlación positiva entre la bajamar y los nutrientes, indicativo de polución de origen antropogénica. La temperatura del agua varió poco estacionalmente, similar a la clorofila-*a* que caracterizó un ambiente eutrófico con valores superiores a 20 mg /m^{-3} . Mayores concentraciones de sal ocurrieron en el mes estival y sin mostrar estratificación vertical. El oxígeno disuelto varió significativamente entre ambos períodos. Los valores totales de nitrógeno y fósforo inorgánico disuelto en julio fueron en promedio

2 y 5 veces superiores a los de enero, respectivamente. Las medias de N:P variaron de 35:1 en enero a 8:1 en julio, siendo ambos, el fósforo y el nitrógeno limitantes para el crecimiento del fitoplancton. Diferencias día/noche evidenciaron que, en enero, el amonio decreció en mayor proporción que el resto de los compuestos nitrogenados, indicativo de la asimilación por los organismos autotróficos durante el día [48].

Los anteriores estudios son relevantes al momento de ver la influencia de las lluvias en sistema como en nuestro caso.

5.3 Calidad del agua en la Ciénaga Grande de Santa Marta CGSM

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) ha sufrido perturbaciones ambientales asociadas al cambio en el curso de agua dulce, mediante un gran proyecto de rehabilitación se está intentando restaurar los valores económicos y sociales del ecosistema mediante su recomunicación con el río Magdalena, Mancera y colaboradores en 2001, determinaron tendencias en la calidad del agua durante los últimos 30 años y potenciales impactos de la recomunicación. Patrones temporales de clorofila, nutrientes ($IND=NO^3+NO^{2+}NH^{4+}$, y PO_4^{-3}), sólidos totales en suspensión, oxígeno disuelto y transparencia fueron examinados, los resultados muestran una estacionalidad determinada por la descarga de agua dulce. Bajas proporciones nitrógeno a fósforo indican al primero como limitante de la producción primaria potencial. El análisis de tendencias mostro incrementos significativos de IND y clorofila. Los cambios en la calidad del agua de la CGSM indican que el sistema se está eutrofizando, sin embargo, la magnitud de este proceso identificado aún antes de la reapertura de los caños difícil de determinar, y es necesario construir índices que permitan adoptar medidas de manejo [49].

En este mismo año Marín y colaboradores, dice que el bosque de manglar asociado a los cuerpos de agua del sistema lagunar estaban colapsando, resultado de las obras que impactaron negativamente dicho sistema. Como parte del proceso de rehabilitación se evaluó la calidad de sus aguas, realizando el seguimiento de las

variables fisicoquímicas, residuos organoclorados, metales pesados y la contaminación microbiológica, entre 1999 y 2000. Los datos obtenidos mostraron la alta variación espacial y temporal relacionada con el comportamiento hidrológico que influye en la calidad química y sanitaria del agua en la región, determinaron una baja calidad de los indicadores ambientales, evidenciando, de acuerdo con la hidrodinámica actual, dos fuentes externas de contaminación: el ingreso de agua desde el río Magdalena que afecta la planicie de inundación y la influencia de los ríos de la vertiente occidental Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en la Ciénaga Grande [50].

En 2003 Navas, para evaluar el papel del sedimento sobre la alta producción primaria de una laguna costera tropical, Ciénaga Grande de Santa Marta (Caribe, Colombia), se midió el flujo de nitrógeno y fósforo (inorgánico disuelto, particulado) en la interfase agua-sedimento. Entre 1996 y 1997 se incubaron núcleos de sedimento en el laboratorio y se ubicaron trampas de partículas en campo, en dos estaciones contrastadas por la influencia de aguas dulces y marinas. Los flujos tuvieron una alta variabilidad espacial y temporal pero no mostraron esquemas claros en su dirección e intensidad en relación con las características de los sedimentos o de la columna de agua de las dos estaciones. Esto evidencia una alta heterogeneidad en la naturaleza y actividad de los organismos responsables de los procesos biogeoquímicos. Los sedimentos liberaron en promedio al agua $1643 \mu\text{molNm}^{-2}\text{d}^{-1}$ de amonio y $1.3 \mu\text{molNm}^{-2}\text{d}^{-1}$ de nitrito, aportando a la columna el 1.90-3.41 % de lo requerido en la producción. En condiciones de oxígeno normales, el sedimento actuó como sifón del fósforo, absorbiendo en promedio $178 \mu\text{molPm}^{-2}\text{d}^{-1}$ disueltos y recibiendo $36277 \mu\text{molPm}^{-2}\text{d}^{-1}$ particulados. Pero el fósforo se mantiene en exceso en la columna, en parte, por liberación desde el sedimento en condiciones anóxicas durante florecimientos microalgales masivos [51].

De La Hoz en 2004, evaluó la dinámica del fitoplancton de la Ciénaga Grande de Santa Marta, realizando muestreos quincenales en seis estaciones entre marzo de 1996 y febrero de 1997. Se determinó la existencia de cuatro temporadas con base en las amplias variaciones de salinidad. Salinidades mayores coincidieron con densidades de fitoplancton más altas, y con salinidades menores ocurrió lo contrario, aunque con mayor riqueza de especies. Se registraron 224 taxa, pocas dominantes y la mayoría raras, mostrando tendencia hacia una diversidad baja. Las cianofitas (también conocidas como cianobacterias) presentaron las mayores abundancias todo el año. Las variables ambientales mejor relacionadas con los datos biológicos fueron salinidad, turbidez y ortofosfatos. Se discuten cambios temporales del fitoplancton en relación con condiciones meteorológicas, aportes fluviales y marinos a la Ciénaga y el dragado del caño Clarín [52].

En 2007 Parra y Espinosa, utilizaron el sedimento asociado a la especie *Rhizophora mangle* del Río Sevilla- Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), realizando dos ensayos de contacto para evaluar la capacidad de adsorber los metales Cd, Pb y Zn y la competencia de estos metales por los sitios de adsorción. La isoterma de Langmuir mostró el siguiente comportamiento de adsorción $Pb \gg Cd > Zn$, lo cual guarda una estrecha relación con lo observado en el sistema natural, donde la mayor concentración de las formas no biodisponibles fue de Pb. Por otra parte, se realizaron ensayos de desorción en función de la salinidad, de los cuales se evidenció una fuerte competencia entre el Zn y el Cd por los sitios de adsorción, y se mostró la influencia de esta variable en la movilidad de los metales en estudio, con un orden de desorción de $Cd > Zn \gg Pb$ [53].

En la CGSM se alojan siete poblaciones carentes de un sistema de saneamiento básico adecuado, que vierten sus desechos sin ningún tipo de tratamiento directamente a la ciénaga. Teniendo en cuenta la importancia ambiental de este cuerpo de agua y con el objeto de conocer su calidad sanitaria, Narvaez en 2008,

analizo las concentraciones de coliformes termotolerantes en aguas adyacentes de dos poblaciones costeras (Tasajera e isla del Rosario) y tres palafíticas (Buenavista, Nueva Venecia y Trojas de Cataca) durante el periodo 2004-2007. Adicionalmente, se realizaron mediciones de pH, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en cada sitio de muestreo. Las mayores concentraciones de coliformes se encontraron en el palafito Trojas de Cataca, en la época seca mayor de cada año (7.800-9.000 NMP/100 mL) y los menores niveles en la estación Buenavista (2-1.100 NMP/100mL). El patrón de comportamiento de las densidades de coliformes en las poblaciones costeras fue similar en el tiempo y no se observó ninguna relación directa entre las variables fisicoquímicas y el grupo coliformes. Dado lo observado, se considera importante vigilar la calidad del agua en el estuario, teniendo en cuenta que constituye una fuente potencial de riesgo para el desarrollo de las actividades económicas de la zona y para la salud de los pobladores, al igual que la calidad fisicoquímica de la agua como la protección de flora y fauna [54].

6. RESULTADOS

Los resultados del comportamiento de las precipitaciones para los cuatro años de seguimiento y la estimación del índice de calidad del agua para la CGSM se muestran a continuación.

6.1. Determinación de la variación temporal y espacial de las lluvias en el área de estudio.

Para determinar la variación temporal y espacial de lluvias en el área de influencia de la Ciénaga Grande de Santa Marta en el periodo 2006-2009, se utilizaron datos suministrados por el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales- IDEAM y de los aeropuertos de Santa Marta y Barranquilla, las estaciones de seguimiento se escogieron teniendo en cuenta la proximidad y representatividad al área de estudio, las cuales son: aeropuerto Simón Bolívar - Santa Marta, Aeropuerto Ernesto Cortissoz - Barranquilla, Las Flores - Barranquilla, Pueblo Viejo - Tasajera; La Figura 4 a continuación ilustra las ubicaciones de las estaciones seleccionadas.

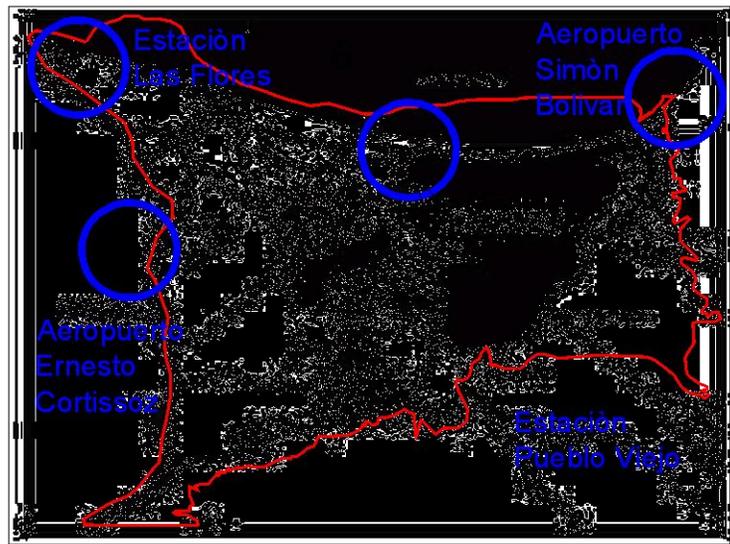
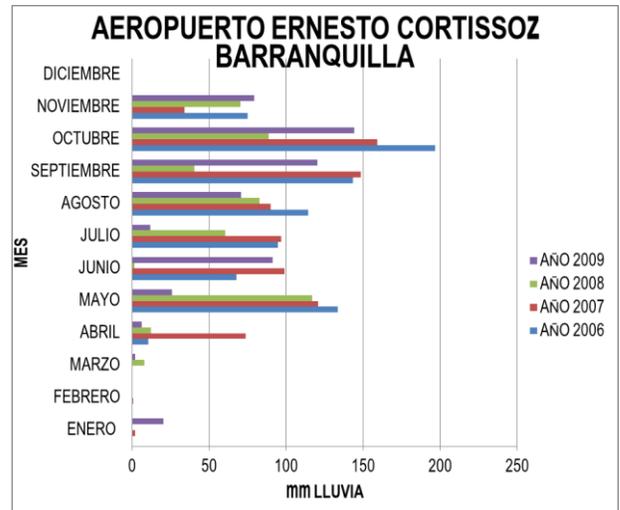
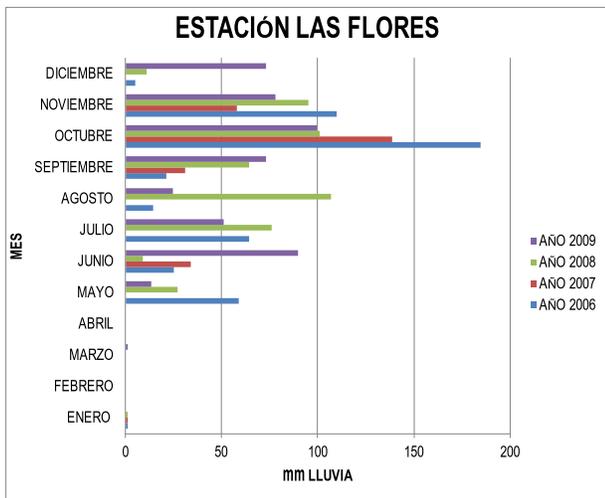


Figura 4. Mapa ilustrativo de las estaciones seleccionadas para el seguimiento de la pluviosidad en el área de estudio.

Se muestra el comportamiento de las precipitaciones mensuales en La Figura 5 a través de los años 2006 a 2009 por cada una de las 4 puntos de monitoreo.



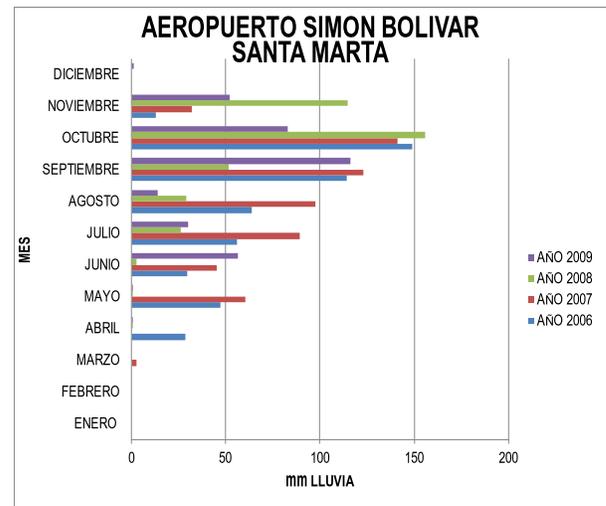
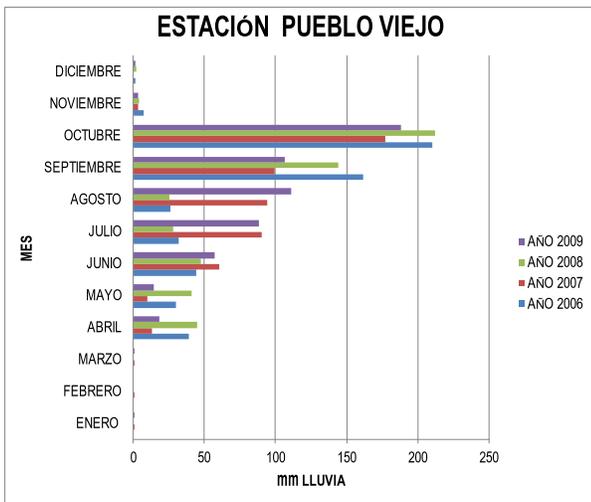


Figura 5. Comportamiento de las precipitaciones mensuales a través de los años 2006 a 2009 en las estaciones de Las Flores, Pueblo Viejo, aeropuerto Ernesto Cortissoz y aeropuerto Simón Bolívar.

Es característica común para los cuatro puntos seleccionados como indicadores de pluviosidad, que los meses de enero, febrero y marzo a través del periodo comprendido entre los años 2006 a 2009, presentan poca presencia de lluvias lo cual nos indica que parte del año es época seca, situación que se puede soportar en función a un comportamiento histórico de la pluviosidad en esta zona específicamente, trayendo consigo una serie de consecuencias en el sistema estuario, ya que algunas variables fisicoquímicas se ven influenciadas por este hecho siendo la salinidad el mas particular parámetro y el cual crea unos determinados contextos que impactan el ecosistema tanto acuático como de manglar, como por ejemplo la migración del recurso pesquero dulceacuícola que migra a otras zonas por la característica del agua y el decrecimiento del material vegetal, por otra parte, los meses de septiembre, octubre y noviembre, poseen un comportamiento abismalmente distinto, ya que es donde se presentan la mayoría de la precipitaciones, característica importante para nuestro estudio en el sentido de establecer la relación que estas épocas tienen sobre la calidad del agua del sistema estudiado, y donde ocurren impactos ambientales de la misma magnitud que el periodo seco pero con manifestaciones totalmente diferentes. Para nuestro estudio, se estableció el mes de febrero como mes característico de la época seca y el mes de octubre como lluvioso, siendo lo planteado acorde con la decisión inicial en la metodología y cumpliendo así con la meta del primer objetivo específico propuesto.

La Figura 6, muestra el comportamiento promedio de la salinidad durante el periodo 2006 - 2009, para las épocas de lluvia y seca, los ciclos de aumento y disminución en la concentración de esta variable dentro del complejo lagunar, se repiten a lo largo del tiempo de estudio.

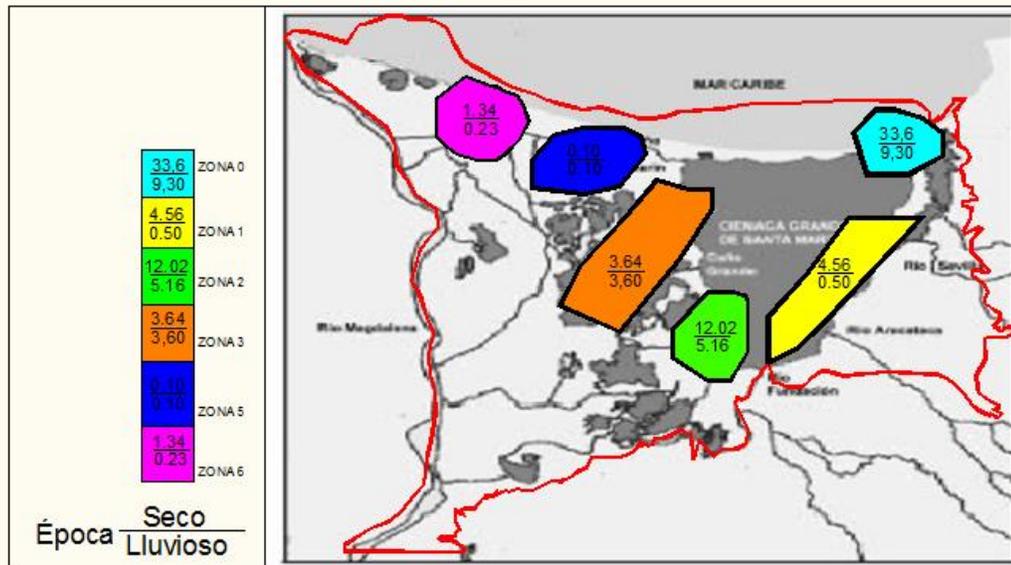


Figura 6. Esquema del comportamiento promedio de la salinidad (‰) para la época seca y lluviosa.

Teniendo en cuenta estudios el sistema ha presentado condiciones salinas diversas (entre 0 y 40.8) desde los periodos de lectura (1993-2002) mientras que para el periodo (2006-2009) las condiciones salinas variaban (entre 0 y 33.6), 7.2 unidades de salinidad menos que el periodo inicialmente analizado lo cual denotan los diversos procesos de intercambio acuático así como fronteras del estuario con el Mar Caribe y el Río Magdalena. El promedio salino fue de 14.09 para todo el conjunto de zonas monitoreadas durante el período de muestreo (1993 a 2002). Mientras que para el periodo (2006-2009) el promedio fue 9.21 y los valores más altos para ambas mediciones se obtuvieron en la estación del Marina (0), donde históricamente se han observado salinidades altas. Estos altos valores se originan en situaciones de alta evapotranspiración, poca precipitación o insuficiente entrada de agua dulce a través de los caños, los cuales representan cambios cíclicos en las condiciones meteorológicas de la zona. El análisis temporal indicó que la salinidad posee un comportamiento de incremento a principios de cada año en todos los sectores, excepto para el sector 5 (Río Magdalena). Esta tendencia de aumento, se interrumpe a mediados de año como consecuencia del ingreso de agua dulce al sistema, desde los ríos y caños que la rodean. Esto parece ser una condición natural y se pueden

observar los marcados ciclos para el sistema que dependen de las temporadas climáticas [55].

6.2 Evaluación de la calidad del agua de la CGSM y su relación con las épocas de lluviosa y Seca.

El área de estudio distribuida en seis zonas hidrobiológicamente comunes, para efectos de identificar el comportamiento del ICAM, en el periodo comprendido entre los años 2006 a 2009, la variación temporal y espacial de la pluviosidad, arrojó resultados que nos condujeron a establecer el mes de febrero como característico de la época seca y octubre el mes representativo de la temporada lluviosa, la figura 7, nos ilustra la relación del ICAM para la zona 0 y la época de lluvia.

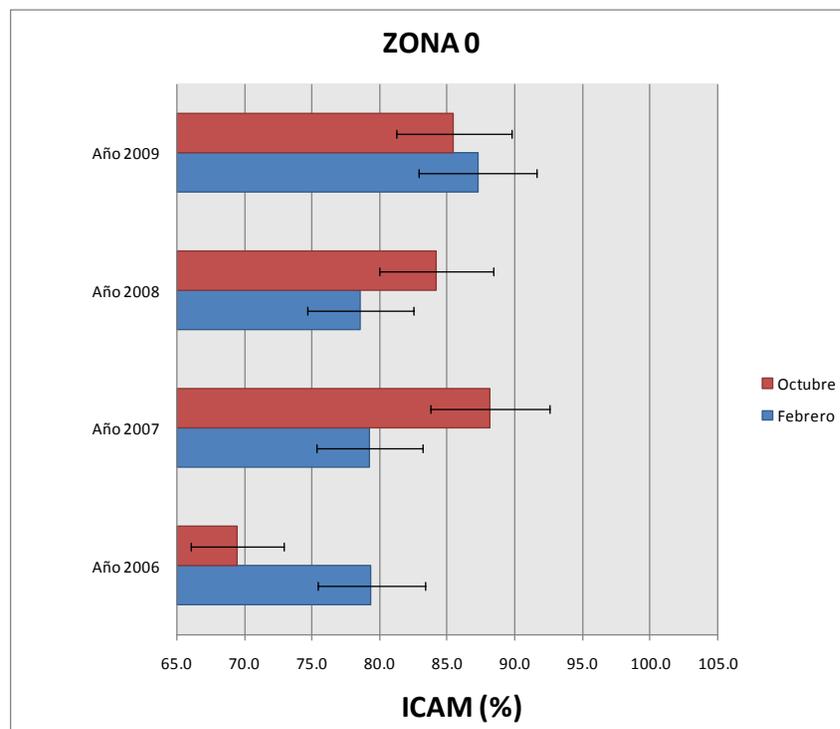


Figura 7. ICAM 2006-2009 para la zona "0" en la época seca y lluviosa.

Teniendo en cuenta el rango de representación numérica del indicador ICAM y comparando los resultados obtenidos para la zona 0, para el año 2009 el indicador tuvo un comportamiento que coincide con el descriptor *excelente*, tanto para el mes seco como para el lluvioso e igual comportamiento para los años 2007 y 2008, pero es notoria la tendencia de los resultados a estar por el valor inferior del intervalo que es 76, luego nos da una lectura de la situación de comportamiento de la calidad del agua en esta zona totalmente marina y que en época seca aumenta aun más el parámetro crítico de la salinidad, los resultados de esta zona si bien están excelentes en relación a estos tres años en particular, se pueden sustentar en la capacidad de amortiguamiento del sistema y al permanente movimiento y dinámica de entrada y salida de agua, para el año 2006 los resultados se enmarcan el descriptor *bueno* 51-75, situación que se explica en forma semejante a los anteriores años pero con el agravante de la influencia de los fenómenos climáticos "El Niño" y "La Niña" que se hicieron sentir en ambas épocas, en la lluviosa un poco más que la seca para este año en particular y la posible llegada a este punto de las descargas de los ríos tributarios de la Sierra Nevada de Santa Marta y una inclemente actividad antrópica, los resultados en esta zona son satisfactorios, pero hay que tener en cuenta que el indicador ICAM utilizado solo evalúa el grado de naturalidad del sistema y no los agentes contaminantes, que bien pudieran afectar y los resultados del indicador estuvieran por los rangos del descriptor *regular* 26-50 o *malo* 0-25.

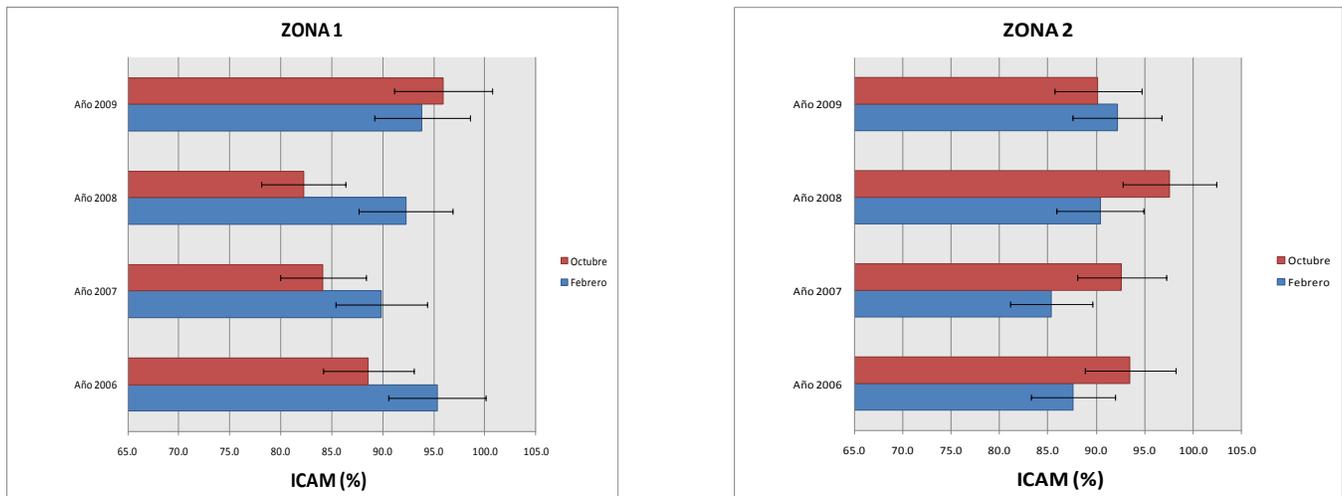


Figura 8. ICAM 2006-2009 para la zona "1 y 2" en la época seca y lluviosa.

El ICAM de las zonas 1 y 2 se muestra en la Figura 8, el grafico es claro en el hecho de que a excepción del año 2009 para la zona 1, el indicador presenta mejor comportamiento para el mes de febrero favoreciendo a la época seca y en contraste para el 2009, en la zona 2 el desempeño del indicador es exactamente igual pero dando la importancia del mayor ICAM al mes de octubre, este tipo de situaciones se basan en gran parte a su posición geográfica dentro del sistema estuarino, ya que con la llegada de las lluvias se incrementan los nutrientes tales como, las formas del nitrógeno y del fosforo, volviéndose en unos posibles tensores del sistema, pero las diferencias pudieran ser mayores con el cálculo completo, si bien cada zona tiene sus propias características aquí son evidenciadas y la previa descripción del área de estudio y de las zonas en específico.

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos para las zonas 3 y 5 (Figura 9), ya que la zona 4 no fue monitoreada por motivos de orden público que imposibilitaron la llegada hasta esos puntos de muestreo, la zona 3 cuya característica principal es ser el espejo de la ciénaga, cuyo territorio recoge casi que la mayoría de las características del sistema estuarino, presenta comportamientos

similares para los años 2006, 2007 y 2008 y un cambio significativo en el año 2009, todo esto relacionado con el ICAM y la época de lluvia, esto es mayor para los tres años en lluvia y seca para el año del cambio, fenómeno que se explica mediante las eventualidades climáticas ocurridas y en consecuencia aumento de las cargas de los ríos y efluentes que finalizan su recorrido en la ciénaga.

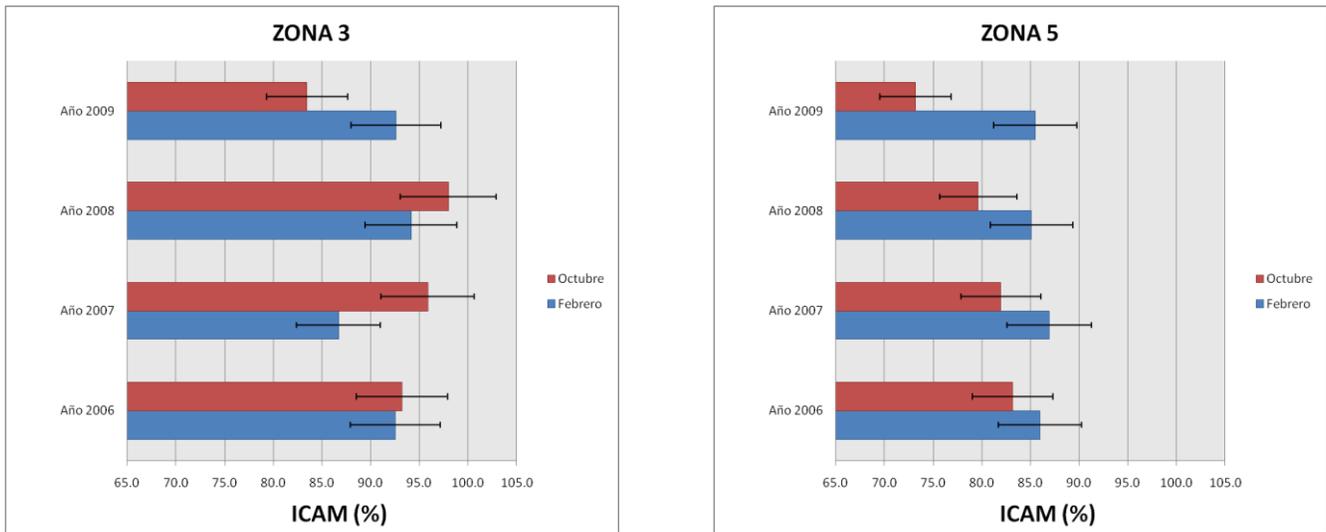


Figura 9. ICAM 2006-2009 para las zonas "3 y 5" en la época seca y lluviosa.

Como se aprecia en la figura correspondiente a la zona 10 se puede observar en el grafico que para el año 2009, el comportamiento para ambas épocas es muy similar encontrándose los valores obtenidos en el rangos superiores a 90 adoptando un descriptor de excelente, en la figura se describe el comportamiento para los años 2007, 2008 y 2009 para estos los valores del indicador para el periodo seco son mucho mayores que para los periodos lluviosos.

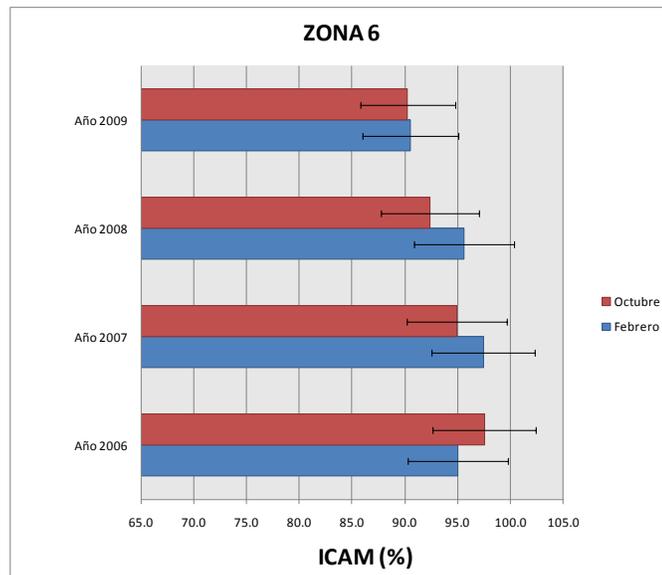
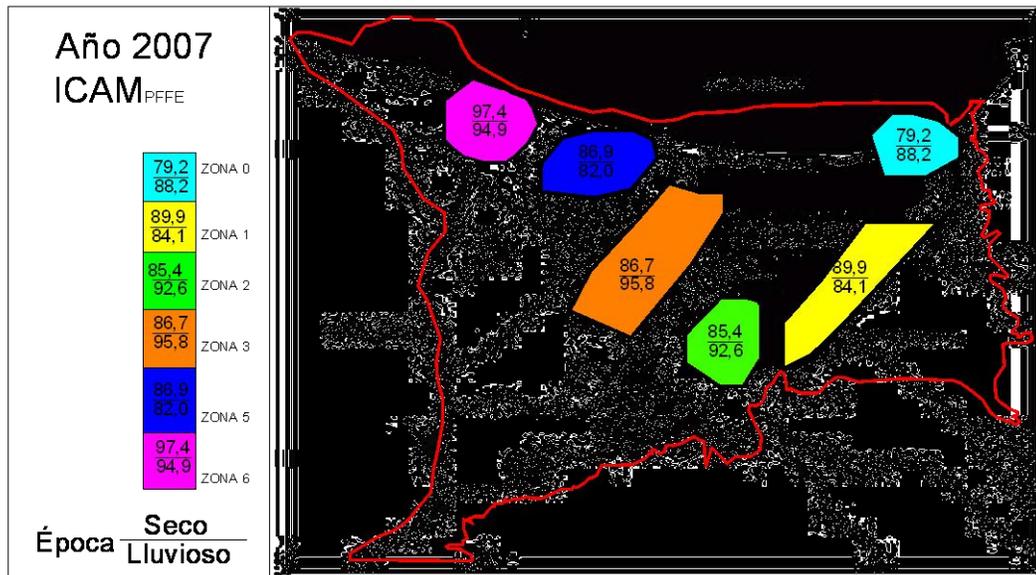
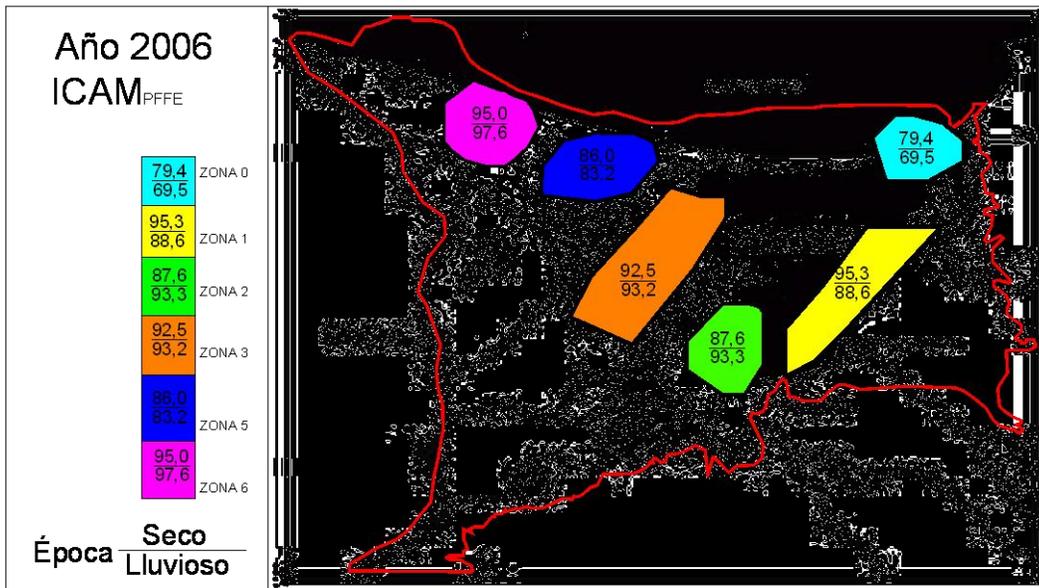


Figura 10. ICAM 2006-2009 para la zona "6" en la época seca y lluviosa.

A continuación se muestran las ilustraciones correspondientes a la variación espacial del ICAM, haciendo un análisis de la situación y pese a que podíamos pensar que la calidad del agua en el complejo estuarino debería mejorar con los aportes de caudal generados en los periodos lluviosos y a su vez refrendarse en el descriptor, lo que se advierte en la grafica es lo contrario y los valores del descriptor son mejores en el periodo seco.

Esto tiene su explicación gracias a que con la llegada de el periodo invernal los ríos Magdalena y los aportes hechos por los ríos afluentes a la CGSM que trasportan escorrentías pluviales de los municipios de Aracataca, Fundación y Sevilla los denominados municipios que conforman "Zona Bananera"[39] que requieren para el control de plagas y de crecimiento vegetal de plaguicidas y fertilizantes cuya presencia representa aumentos de las formas del nitrógeno y del fosforo, que por su composición química resultan persistentes en el ambiente generando un posible aumento de nutrientes que pueden generar escenarios favorables a lo que se conoce con el nombre de eutrofización [40], mientras que en los periodos secos esto no ocurre contribuyendo notoriamente con la calidad de agua en el estuario.



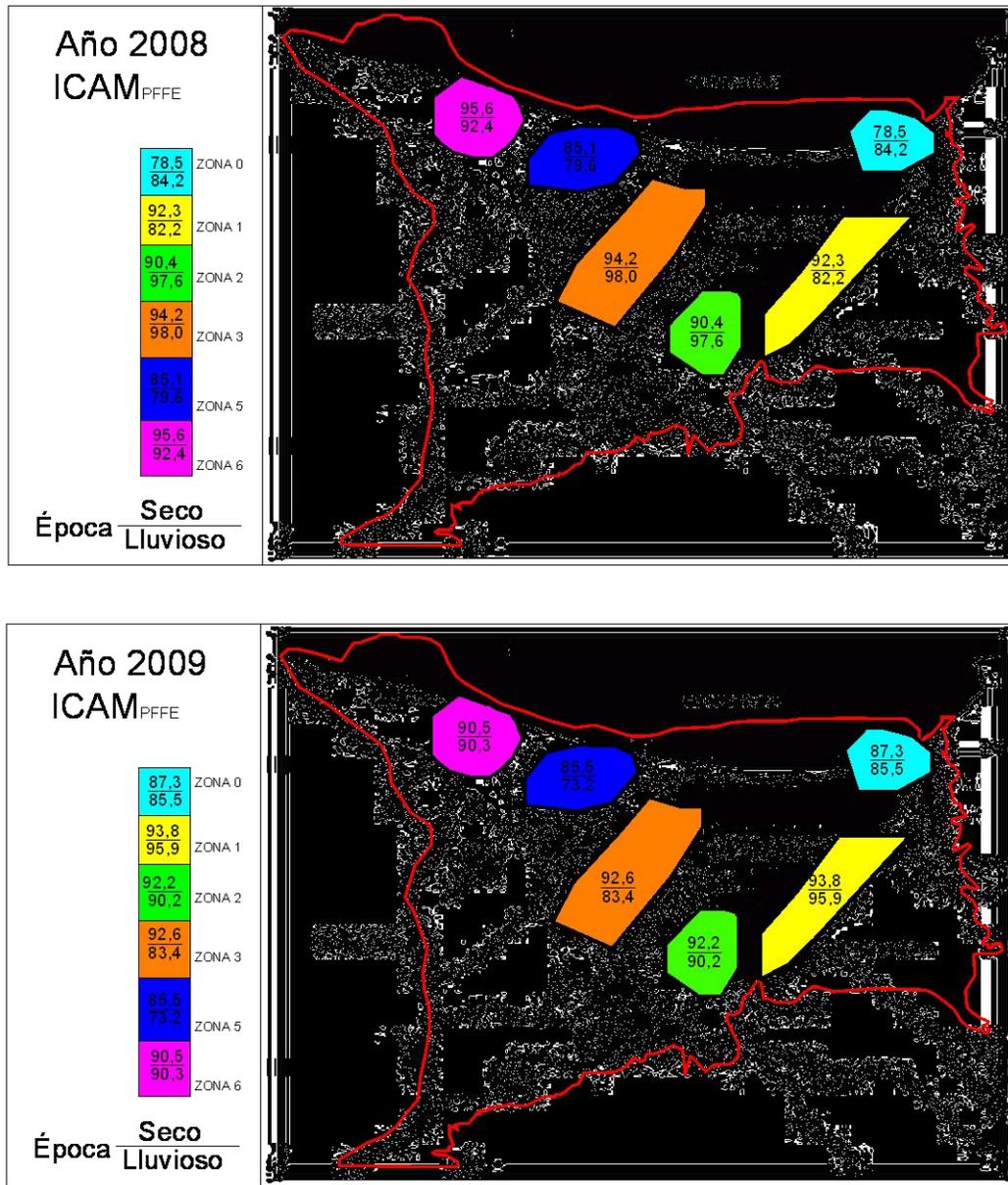


Figura 11. ICAM 2006-2009 periodo seco y lluvioso para la CGSM

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este tipo de indicadores se convierten en herramientas útiles pues durante el desarrollo de este trabajo se hizo visible que se constituye en un determinante para la toma de decisiones y en el complemento apropiado para generar una gestión ambiental integral, los datos obtenidos muestran en contexto general valores que en las escalas de los descriptores pueden clasificarse como excelentes, pero no podemos perder de vista que el análisis realizado solo es extensivo a evaluar la calidad del agua en su naturalidad es muy probable que al momento de evaluar los efectos de los contaminantes encontremos que estos porcentajes tiendan a disminuir, y los próximos valores de calidad puedan encontrarse entre los rangos (26-50) regular o (51-71) bueno presumiblemente.

El comportamiento mostrado por la evaluación del indicador durante el periodo de estudio comprendido entre el año 2006 y 2009 guarda relación estrecha con los valores de calidad obtenidos durante el periodo (1993-2002), tal vez uno de los factores que ha permitido la recuperación del estuario va de la mano de las obras hidráulicas realizadas las cuales han proporcionado una nueva dinámica de flujo al interior del ecosistema.

Teniendo en cuenta estudios el sistema ha presentado condiciones salinas diversas (entre 0 y 40.8) desde los periodos de lectura (1993-2002) mientras que para el periodo (2006-2009) las condiciones salinas variaban (entre 0 y 33.6), 7.2 unidades de salinidad menos que el periodo inicialmente analizado lo cual denota los diversos procesos de intercambio acuático así como fronteras del estuario con el mar Caribe y el Río Magdalena.

La variación temporal y espacial de la pluviosidad, arroja resultados que nos condujeron a establecer el mes de febrero como característico de la época seca y octubre el mes representativo de la temporada lluviosa, estos resultados fueron obtenidos después de tabulada la información de la pluviometría entre los años del 2006 al 2009 obtenida de los distintas estaciones las cuales son: aeropuerto Simón Bolívar - Santa Marta, Aeropuerto Ernesto Cortissoz - Barranquilla, Las Flores - Barranquilla, Pueblo Viejo - Tasajera como lo ilustra la Figura 1. La información compilada condujo a plantear que el indicador desde la óptica del estado de naturalidad presenta valores que están entre el rango (Bueno- Excelente) esto teniendo en cuenta el comportamiento histórico de la pluviosidad y algunas variables fisicoquímica del sistema estudiado que se encuentra determinado por contextos que impactan a los diferentes ecosistemas.

A lo largo del desarrollo de este estudio, se realiza una detallada descripción del estado del arte de los indicadores de calidad ambiental de las aguas Marinas y Estuarinas para la preservación de flora y fauna ICAM_{PFF}, encontrando un gran espectro de aplicabilidad en la calidad de las aguas marinas y costeras pero con mayor énfasis en los sistemas estuarinos como es el caso del presente trabajo, es importante recalcar que los resultados obtenidos del ICAM pueden ser relativos y es necesario ser prudentes en el uso del indicador, por eso se recomienda seguir las indicaciones para el uso adecuado del mismo con miras a obtener resultados confiables y aplicables a las condiciones de calidad de las aguas marinas y costeras de Colombia.

El ICAM es un indicador de estado de la calidad del agua que se concibe atendiendo a los tipos de aguas estuarinas y marinas y sus usos más relevantes en concordancia con el Decreto 1594 de 1984 y de acuerdo a su formulación, éste sólo responderá a cambios de estado que suceden en los sistemas hídricos marino-costeros. El Indicador de Calidad del agua Marino-Costera, se formuló como una herramienta mediante la cual fuera posible proporcionara información sobre el estado de las aguas y los

recursos marinos y costeros asociados a ella de forma confiable, oportuna, sistematizada y actualizada que apoye la investigación y la gestión ambiental de las zonas costeras colombianas a escala local, regional y nacional.

El sistema estuarino CGSM presenta todas las características y cumple con todas las condiciones necesarias para la aplicabilidad de esta metodología innovadora, además de ser una importante reserva natural y representar una de las principales fuentes de sustento para la población de los 11 municipios que tienen asiento sobre su orilla, de la información tabulada de la investigación bibliográfica se infiere que el indicador desde la óptica del estado de naturalidad presenta resultados favorables lo cual se confirma con los rangos obtenidos en las escalas.

Se recomienda desarrollar un análisis más representativo, complejo y diciente de la condición de este sistema estuarino, la inclusión de todos los componentes del ICAM, esto sería una nueva investigación utilizando como insumo el presente trabajo. no se puede desconocer la existencia de un gran número de sistemas estuarinos en la costa Caribe Colombiana los cuales envisten una considerable importancia para las poblaciones que se encuentran en su área de influencia, para lo cual recomendamos la realización de trabajos que propicien escenarios de investigación y discusión similares a los propuestos en la CGSM ya que estos sitios son fuentes de Recursos Pesqueros, Biodiversidad y Reservas Naturales de mucha importancia para el País.

El ICAM se comportará como un argumento a la hora de evaluar y diagnosticar la calidad ambiental de los ecosistemas marinos en un momento dado, puesto que este no suplirá la necesidad de realizar investigación aplicada para buscar las respuestas de las causas, efectos y soluciones a la problemática ambiental.

- Puede usarse como una aplicación periódica para lograr referencias históricas.
- Dar alarmas sobre el estado de los recursos naturales.

- Ayuda el hacer tangible una realidad: saber qué hay, cuanto hay y cómo fluctúa en el tiempo.
- Contribuye en la información base para apoyar la toma de decisiones en la gestión ambiental marina y costera.

Dentro de las limitaciones del indicador se pueden mencionar:

Algunos valores utilizados como referencias en las curvas de funcionamiento no forman parte de la normativa colombiana (decreto 1594 de 1984), de manera que estándares internacionales fueron el soporte escogidos al no existir valores definidos para el país, sobre límites permisibles en las aguas marinas y costeras.

La baja divulgación entre las entidades (CAR's, Institutos de Investigación, Universidades, etc.) y los usuarios potenciales del indicador perjudican el flujo de información y la retroalimentación de experiencias específicas que favorezcan la evaluación constante, renovación, actualización y su propio mejoramiento. Su aplicación está sujeta a la información disponible de los parámetros que conforman el indicador y si se requiere del cálculo inmediato, no será posible porque los análisis de laboratorio llevan su tiempo.

Avanzar y profundizar en el desarrollo matemático de las curvas de funcionamiento para afinar el proceso de calibración, validación e implementación que permita mayor eficacia en el resultado y su estandarización.

El porcentaje de error generado por el cálculo no ha sido determinado, pero se sabe que en este tipo de agregaciones de parámetros hay pérdidas (error de precisión) en el proceso, creando una “pequeña” desviación en la estimación del resultado. Sin embargo, en este sentido se han realizado pruebas para deducir el grado de confianza estadística del procedimiento el cual es importante cuando de calidad ambiental se trata.

Verificar que la procedencia de los datos, en especial los datos de laboratorio (contaminantes y microbiológicos) hayan sido calculados y/o determinados teniendo en cuenta los procedimientos y técnicas de análisis propuestos o sugeridos en el protocolo de monitoreo de calidad de aguas marinas y costeras.

Deben las alcaldías municipales y sus respectivas secretarías de salud de conjunto con las comunidades, prestar atención al manejo de las excretas producidas por los pueblos palafíticos y de igual forma al vertimiento de residuales domésticos por los pueblos ribereños, evaluando la alternativa de construir pozos sépticos o estudiar la posibilidad de crear lagunas facultativas de oxidación, con el beneficio de utilizar sus aguas residuales como materia prima para la obtención de metano como producto secundario de la descomposición de este proceso.

La aplicación de las normas y decretos existentes en cuanto al uso de plaguicidas organoclorados, por parte de la Corporación y el Municipio (CORPAMAG y autoridades), dado el impacto y la gran actividad agrícola que se desarrolla en las cuencas de los ríos Sevilla, Fundación y Aracataca.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Márquez, G., 1996. Ecosistemas estratégicos y otros estudios de ecología ambiental. Fondo FEN Colombia. Santa Fé de Bogotá.
- [2] Orrego, N., Londoño, F. & Rojas, E. 1999. Manejo eficiente del recurso hídrico en las microcuencas. Tesis Profesional. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Manizales
- [3] Sánchez, H. 1999. Enfoque ambiental de los problemas del recurso hídrico. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (cuadernos técnico-científicos). Bogotá
- [4] Figueroa, R.; Araya. E.; Parra, O. & Valdovinos, C., 2000. Macroinvertebrados Bentónicos como indicadores de calidad de agua. Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile, Universidad de Concepción, Chile
- [5] Instituto Mi Río. 1997. Aspecto biológico y fisicoquímico del río Medellín. Universidad de Antioquia. Medellín. Tomo I, p. 138
- [6] Ramírez, G. 2001. IX Congreso Latinoamericano Sobre Ciencias del Mar San Andrés Isla, Colombia Septiembre 16 – 20, Variaciones Espacio Temporales de los Principales Indicadores Ambientales Tomados En Una Laguna Costera Tropical (Ciénaga Grande de Santa Marta)
- [7] Cotes, G. 2004. Gestión institucional para la rehabilitación de la ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta y sus bosques de manglar, pp. 41-58 *In*: Garay, J., J. Restrepo, O. Casas, O. Solano & F. Newmark (eds). Los manglares de la ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta: pasado, presente y futuro. INVEMAR-Serie de publicaciones especiales No.11. Santa Marta.236 p
- [8] INVEMAR. 2005. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe técnico final. INVEMAR, 108 pp
- [9] Bianucci, S.P., Ruperto A. R., Depettris, C.A. & Clemente, M.T. 2005. Aplicación de indicadores de impacto ambiental al estudio de calidad de aguas continentales: caso de la laguna Los Lirios, Resistencia, Argentina. Comunicaciones científicas y tecnológicas. Resumen T-0.38. UNNE. Disponible en: www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2005/7-Tecnologia/T-038.pdf

- [10] DNP, 2007. 2019 Visión Colombia II Centenario. Aprovechar el territorio marino-costero en forma eficiente y sostenible. Propuesta para discusión. Excelsior impresores. Bogotá. 101 p.
- [11] Robles, T. & Luna, R. 1999. Elaboración de indicadores para proyectos ambientales. PROARCA/CAPAS.AID 42 p
- [12] Quiroga, R. 2001. Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. CEPAL - Serie Manuales No 16. División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos. Santiago de Chile. 118 p.
- [13] Escobar, L.A. 2008. Indicadores ambientales sintéticos: una aproximación conceptual desde la estadística multivariante. *Gestión y Ambiente*, 11: 121-140
- [14] Suárez, D.C. 2003. Indicadores e Índices Ambientales: Marco Teórico de Indicadores. Programa de Información e Indicadores de Gestión de Riesgos de Desastres Naturales. Ejecución del componente II. Indicadores de Gestión de Riesgos. Operación ATN/JF-7907-RG. BID-CEPAL-IDEA. Manizales. 20 p
- [15] Wallner-Kersanach, M. 1997. Asesoría a corto plazo para calidad de aguas. Informe para PROCINENAGA, Santa Marta. 20 p.
- [16] Blanco, J.A., Díaz, J.M., Ramírez, G. & Cortés, M.L. 1992. El Banco de las Ánimas: una amplia área arrecifal localizada sobre un antiguo delta del Río Magdalena. Resúmenes del VII Seminario de las Ciencias y las Tecnologías del Mar y Congreso Centroamericano y del Caribe en Ciencias del Mar, Comisión Colombiana de Oceanografía. Santa Marta. 40 p.
- [17] Pérez-Castillo, A. & Rodríguez A. 2008. Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental, Universidad de Costa Rica, 2060 San José (Costa Rica)
- [18] López-López, E. & Serna-Hernández, J. A. 1999. Variación estacional del zooplancton del embalse Ignacio Allende, Guanajuato, México y su relación con el fitoplancton y factores ambientales. *Rev. biol. trop*, 47 (4): 643-657.
- [19] Sampaio, E, Rocha, O., Matsumura-Tundisi, T. & Tundisi, J. 2002. Composition and abundance of zooplankton in the limnetic zone of seven reservoirs of the Paranapanema River, Brazil. *Braz. J. Biol.*, 62: 525-545.
- [20] Posada, G., Roldán-Pérez., G. & Ramírez, J.J. 2000. Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad de las aguas de la Cuenca de la Quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Rev. Biol. Trop*, 48 (1): 59-70.
- [21] Chalarca, D. & Mejía R. 2007. Aproximación a la determinación del impacto de los vertimientos de las aguas residuales domésticas del municipio de Ayapel, sobre la calidad del agua de la Ciénaga. *Rev. Fac. de Ingeniería, Univ. de Antioquia*, Número 40: 41-58

- [22] Montoya, Y. 2008. Variaciones nictemerales de algunas variables climáticas, físicas y químicas en una laguna somera en Guatapé (Antioquia), Colombia Actual. Biol., 30 (88): 83-96
- [23] Calero, L.A., Tuchkovenko, Y. & Lonin, S. 2002. Modelo numérico de calidad de aguas para la Ciénaga Grande de Santa Marta. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, Cartagena, Colombia, Completar
- [24] Smith, D.G. 1990. A better water quality indexing system for rivers and stream. Water Research, 24: 12-37.
- [25] Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984. República de Colombia. Ministerio de Agricultura. 1984. Capítulo III De La Destinación Genérica de las Aguas Superficiales, Subterráneas, Marítimas, Estuarias y Servidas Artículo 31.
- [26] Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984. República de Colombia. Ministerio de Agricultura. 1984. Capítulo IV De Los Criterios de Calidad para destinación del recurso.
- [27] Pino, M. E. 2001. Análisis de indicadores de sostenibilidad ambiental y urbana en las Agenda 21 local y ecoauditorías municipales. El caso de las regiones urbanas europeas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Programa Gestión y valoración urbanística. Barcelona. 249 p
- [28] Hammond, A., Adriaanse, A., Rodenburg, E., Bryant, D. & Woodward, R. 1995. Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development. World Resources Institute. Washington. 58 p.
- [29] Benites J.R., Shaxson, F. & Vieira, M.. 2009. Indicadores del cambio de condición de la tierra para el manejo sostenible de los recursos. *In*: Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. Departamento de Desarrollo Sostenible – DDS. Disponible en: <http://www.fao.org>. 29/04/2009
- [30] Pender, A., Dunne, L. & Convery, F. 2000. Environmental indicator for the urban environment: A literature review. Working Papers, Environmental Studies Research Series. University College, Dublin.
- [31] EEA/AMAE. 2002. Towards an urban atlas: Assessment of spatial data on 25 European cities and urban areas. Environmental Issue Report, 30. Copenhagen.
- [32] CCE. 1994. Directions for the EU on Environmental Indicators and Green National Accounting. The Integration of Environmental and Economic Information Systems. Commission to the Council and the European Parliament. Revista Oficial, COM, 670. Bruselas.

- [33] Hakanson L, Parparov, A, Ostapenia, A, Boulion, V.V. & Hambright, K.D. 2000. Development of a system of water quality as a tool for management. Final Report to INTAS, Uppsala University, Department of Earth Science, 19.
- [34] Straskraba M. & Gnauck, A.H. 1985. Freshwater ecosystems. Modelling and Simulation. Development in Environmental Modelling, Elsevier, 373 p.
- [35] Troncoso, W., Vivas-Aguas, L.J., Narváez, S. & Sánchez, J. (Eds.). 2008. Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM. Informe técnico. INVEMAR. Santa Marta. 296 p.
- [36] Marín, B., Martín L., Garay, J., Troncoso, W., Betancourt, J., Gómez, M., Acosta, J., Vivas, J. & Vélez, A. 2003. Sistema de Indicadores de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia - SISCAM. Programa Calidad Ambiental Marina. Informe Técnico Final. INVEMAR. 184p.
- [37] Vivas-Aguas, L.J. 2007. Manual de uso de indicadores de la calidad de las aguas marinas y costeras de Colombia. Hojas Metodológicas. Contrato de servicios de consultoría No. 055 06. Convenio No. 001/04 OEI / MAVDT / IDEAM / INVEMAR. Santa Marta. 37 p.
- [38] Garay, J.A., Betancourt, J.M., Ramírez, G., Marín, B., Cadavid, B. Panizzo, L. Lesmes, L. Sánchez, E., Lozano, H. & Franco, A. 2003. Manual de técnicas analíticas para determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos. INVEMAR, Santa Marta, 177 p.
- [39] Bernal, G. & Betancur, J. 1994. El sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta en el contexto deltaico del río Magdalena, Colombia. Mem. IX Congr. Nac. Cienc. Tecnol. Mar, Medellín. CCO, Bogotá, s.p.
- [40] Roldan-Pérez, G. 1992. Fundamentos de Limnología Neotropical. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. 529 p
- [41] Cadavid, B.C., Bautista, P., Betancourt, J.M., Castro, L.E., Villamil, C.A., Orjuela, A.M., Rifaterra, S., Perdomo, L.V., Vilorio, E., Mármol, D. & Rueda, M. 2009. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. INVEMAR. Informe Técnico Final. Santa Marta, 118 p.
- [42] Graca, M. 1998. The elaboration of indices to assess biological water quality. A case study. Departamento de Zoologia, Universidade de Coimbra, 3000 Coimbra, Portugal. Wat. Res., 32 (2): 380-392.

- [43] Fano, E.A., Mistri, M. & Rossi., R. 2003. The eco-functional quality index (EQI): a new tool for assessing lagoonal ecosystem impairment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56 : 709–716
- [44] Beamonte-Cordoba. E., Casino-Martínez, A. & Veres-Ferrer, E. 2010. Water quality indicators: Comparison of a probabilistic index and a general quality index. The case of the Confederation Hidrográfica del Júcar (Spain). *Ecological Indicators*, 10: 1049–1054.
- [45] Yuri S., Tuchkovenko, Y. & L. A. Calero. 2003. Modelo matemático del ecosistema de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 32: 145-167.
- [46] Aubriot, L., Conde, D., Bonilla, S., Hein, V. & Britos, A. 2005. Vulnerability of a coastal lagoon in a Biosphere Reserve: recent indications of eutrophication. *In: Vila, I. & Pizarro (eds) Taller Internacional de Eutrofización de Lagos y Embalses, CYTED, Patagonia Impresores Chile*, p. 65-85. 2005
- [47] Herrera-Silveira, J. A. 2006. Coastal lagoon of Yucatan (Se, Mexico): Research, diagnostic and management. *Sociedad Venezolana de Ecología. Ecotropicos*, 19 (2): 94-108.
- [48] Noriega, Carlos E., Muniz, K., Flores-Montes, M. J., Macêdo, S. J., Araujo, M., Feitosa, F.A. & Lacerda, S. R. 2009. Hydrobiological time series in a tropical estuary (Brazil). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(1): 93-108.
- [49] Mancera-Pineda, J. E., Troncoso, W., Rivera-Monroy, V. H., Twilley, R., R. & Giraldo, R. 2001. Variaciones estacionales e interanuales durante los últimos 30 años en la calidad de las aguas de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Una laguna costera tropical de ambiente árido. *In: IX Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar San Andrés Isla, Colombia Septiembre 16 – 20, 2001. Resumen Ampliado*
- [50] Marín, B., Garay, J., Ramírez, G., Troncoso, W., Cadavid, B, Acosta, J. & Henry, C. 2001. Variaciones espacio temporales de los principales indicadores ambientales tomados en una laguna costera tropical (Ciénaga Grande de Santa Marta). *In: IX Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar San Andrés Isla, Colombia Septiembre 16 – 20, 2001 Resumen Ampliado*
- [51] Navas, S.G.R., Zea, S. & Campos, N.H. 2003. Flujo de nitrógeno y fósforo en la interfase agua - sedimento en una laguna costera tropical (Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano). *CICIMAR-Oceánides*, 18 (2): 45 67.
- [52] De La Hoz-Aristizabal, M. V. 2004. Phytoplankton dynamics in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombian Caribbean. *Bol. Invest. Mar. y Cost. Mar.*, 33 (1):159-179.

[53] Parra, J. P. & L. F. Espinosa. 2007. Acumulación de Pb, Cd y Zn en sedimentos asociados a *Rhizophora mangle*, en el río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31(120): 347-354.

[54] Narváez, S., Gómez, M. & Acosta, J. 2008. Coliformes termo-tolerantes en aguas de las poblaciones costeras y palafíticas de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Acta biol. Colomb., 13 (3): 111-120.

[55] MMA / BID / INVEMAR. 2000. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: Un enfoque de manejo adaptativo. Informe Técnico Final Monitoreo CGSM 1999 - 2002 Convenios MMA / BID / INVEMAR Nos. 029/99 - 058/00 y 062/2001

[56] RAMSAR / MVyDT / CORPAMAG / INVEMAR. 2004. Plan de manejo para el sitio RAMSAR y Reserva de la Biosfera, Sistema Delta Estuarino del río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta, República de Colombia. Informe Final. Santa Marta (Mag.) Colombia