



TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	9
2. INTRODUCCIÓN	12
3. MARCO DE REFERENCIA	16
3.1 ANTECEDENTES	16
3.2 ESTADO DEL ARTE	22
3.3 MARCO TEÓRICO	27
3.3.1 Análisis Físico, Químico y Bacteriológico de las Aguas Naturales	27
3.3.1.1 Análisis Físico.....	27
3.3.1.2 Análisis Químico	28
3.3.1.3 Análisis Bacteriológico.....	29
3.3.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	30
3.3.3 Índice de la Calidad del Agua (ICA)	31
3.3.4 Índice de la Calidad de Aguas Marinas y Costeras para la Preservación de Flora y Fauna (ICAMPFF).....	34
3.3.5 Análisis Estadístico de los Datos.....	36
3.3.5.1 Medidas de Posición	36
3.3.5.2 Medidas de Dispersión.....	37
3.3.6 Decreto 1594 de 1984.....	37
4. OBJETIVOS	44
4.1 OBJETIVO GENERAL	44
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	44
5. METODOLOGÍA	45



5.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN HISTÓRICA DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN.....	47
5.2 DETERMINACIÓN DEL USO DEL CUERPO DE AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN A PARTIR DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES....	52
5.3 ANÁLISIS TENDENCIAL A PARTIR DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	52
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
6.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN HISTÓRICA DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN.....	55
6.1.1 Cálculo de Índices de Calidad del Agua: ICA e ICAMPPF.....	56
6.1.2 Análisis a partir de ICA	62
6.1.3 Análisis Estadístico de Datos (Medidas de Posición y Dispersión)	65
6.1.4 Determinación de Índice de Calidad a partir de la Modelación de Acucar para el periodo posterior a la implementación del Emisario Submarino.....	70
6.2 DETERMINACIÓN DEL USO DEL CUERPO DE AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN A PARTIR DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES....	70
6.3ANÁLISIS TENDENCIAL A PARTIR DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	77
6.3.1 Mapas de Calidad de Agua del Estuario.....	77
6.3.2 Mapa de Zonificación de la Ciénaga de acuerdo a sus Usos	82
6.3.3 Factores Externos al Sistema.....	85
6.3.4 Análisis Tendencial de la Calidad del Agua de la Ciénaga de la Virgen	87
6.3.5 Comparación del Impacto de la Construcción y entrada en Operación de la Bocana con el del Emisario Submarino.....	87
6.3.6 Verificación del cumplimiento de los Objetivos trazados al inicio del Proyecto Emisario Submarino	91



7. CONCLUSIONES	93
8. RECOMENDACIONES	96
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
10. ANEXOS	103



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para consumo humano y doméstico, con potabilización por tratamiento convencional	39
Tabla 2. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para consumo humano y doméstico, con potabilización por desinfección	40
Tabla 3. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso agrícola	40
Tabla 4. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso pecuario	41
Tabla 5. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso recreativo mediante contacto primario	41
Tabla 6. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso recreativo mediante contacto secundario	41
Tabla 7. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para preservación de flora y fauna.....	43
Tabla 8. Coordenadas geográficas de los puntos estudiados	49
Tabla 9. Medidas estadísticas de ICA antes de construcción de la Bocana	66
Tabla 10. Medidas estadísticas de ICA en el período entre Bocana y Emisario.....	67
Tabla 11. Medidas estadísticas de ICA luego de construido el Emisario	67
Tabla 12. Valores límites de algunos parámetros de acuerdo al uso del recurso hídrico....	71
Tabla 13. Usos por puntos de acuerdo a lo fijado en el Decreto 1594 de 1984 para Coliformes Fecales y Totales	72
Tabla 14. Usos por puntos de acuerdo a lo fijado en el Decreto 1594 de 1984 para pH	75
Tabla 15. Usos por puntos de acuerdo a lo fijado en el Decreto 1594 de 1984 para Oxígeno Disuelto	76
Tabla 16. Valores permisibles de algunos parámetros establecidos por USEPA	77
Tabla 17. Promedio de ICA para cada período estudiado.....	78
Tabla 18. Promedio de coliformes Fecales y Totales para 2014.....	82



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escala de calificación de Índice de Calidad de Cuerpos de Agua (ICA)	32
Figura 2. Funciones de Calidad NSF	34
Figura 3. Rango de clasificación o valoración de la calidad del agua del ICAM.....	35
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso realizado en el proyecto de investigación	46
Figura 5. Ubicación geográfica de los puntos estudiados a lo largo del estuario	48
Figura 6. Visualización del manejo del software ArcGIS.	54
Figura 7. Índice de Calidad de Agua - ICA	57
Figura 8. Índice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras para Preservación de Flora y Fauna - ICAMPFF	60
Figura 9. ICA vs Años desde 1999 hasta 2014 – Zona Norte.....	63
Figura 10. Frecuencias de Categorías ICA obtenidas en zona Norte entre 1999-2014	64
Figura 11. ICA vs Años desde 1999 hasta 2014 – Zona Sur	64
Figura 12. Frecuencias de Categorías ICA obtenidas en zona Sur entre 1999-2014.....	65
Figura 13. Frecuencias por categoría según ICA antes de la Bocana	68
Figura 14. Frecuencias por categoría según ICA entre Bocana y Emisario	69
Figura 15. Frecuencias por categoría según ICA antes de la Bocana	69
Figura 16. Promedio de Coliformes Fecales para Zona Norte y Sur del estuario.....	73
Figura 17. Promedio de Coliformes Totales para Zona Norte y Sur del estuario.....	74
Figura 18. Mapa de calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena antes de la Bocana Estabilizada de Marea	79
Figura 19. Mapa de calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena durante el período comprendido entre la Bocana y el Emisario Submarino.....	80
Figura 20. Mapa de calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena luego de la construcción del Emisario Submarino.....	81
Figura 21. Mapa de usos de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena según Coliformes Fecales.....	83
Figura 22. Mapa de usos de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena según Coliformes Totales.....	84



Figura 23. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la Ciénaga de la Virgen entre Agosto 1999 y Septiembre 2002.....	88
Figura 24. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la Ciénaga de la Virgen entre Enero 2012 y Mayo 2014.	88
Figura 25. Comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la Ciénaga de la Virgen entre Agosto 1999 y Septiembre 2002.....	89
Figura 26. Comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la Ciénaga de la Virgen entre Enero 2012 y Mayo 2014.....	90
Figura 27. Conversión de Mapa de Modelación de ACUACAR de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena, en índice de calidad ICA.....	92
Figura 28. Escenario 7: Simulación Oxígeno Disuelto febrero 2005 (NMP/100 ml). Descarga es 10% de la descarga total	103
Figura 29. Escenario 7: Simulación Coliformes Fecales febrero 2005 (NMP/100 ml) Descarga es 10% de la descarga total	103
Figura 30. Escenario 7: Simulación DBO disuelto febrero 2005 (mg/L) Descarga es 10% de la descarga total.....	104
Figura 31. Escenario 7: Simulación DBO en suspensión febrero 2005 (mg/L) Descarga es 10% de la descarga total.....	104
Figura 32. Escenario 7: Simulación Nitrato febrero 2005 (mg/L) Descarga es 10% de la descarga total.....	105
Figura 33. Escenario 7: Simulación Fosfato febrero 2005 (mg/L) Descarga es 10% de la descarga total.....	105



1. RESUMEN

El presente trabajo investigativo tiene como objetivo principal analizar la variación de la calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen de la ciudad de Cartagena de Indias, desde el año 1999 hasta la construcción y entrada en operación del Emisario Submarino en el año 2013. Esto debido a que es de gran importancia contribuir a la recuperación y preservación de dicho estuario, ya que ofrece un ambiente que podría ser aprovechado tanto para actividades recreativas como comerciales. Para ello se realizó una investigación de tipo documental – descriptiva, en donde se analizó la variación histórica de la calidad del agua del estuario por medio de promedios en épocas de sequía, transición y de lluvia en términos de índices de calidad, a partir de la recopilación de información secundaria, relacionada básicamente con muestreos mensuales de parámetros físico-químicos y microbiológicos en diferentes puntos ubicados a lo largo del mismo; y se calcularon dos índices de calidad (ICA e ICAM) además de algunas medidas estadísticas de posición y dispersión. De esta manera se obtuvo que en promedio, antes de la implementación del Emisario Submarino la calidad del agua de la Ciénaga era Media con un valor mínimo de 55, y luego de su construcción pasó a categoría Buena con un valor máximo de 85.7. Además, según las Normas Colombianas vigentes se obtuvo que es adecuada para Contacto Primario aunque con respecto a coliformes termotolerantes para el año 2014 se identifican dos puntos críticos con valores hasta de 2031.8 NMP/100 ml. Por último, se realizó un análisis tendencial a partir de Sistemas de Información Geográfica, utilizando el software ArcGIS, y al compararlo con una Modelación matemática realizada por ACUACAR en el año 2003 se determinó que no se ha cumplido a cabalidad las metas trazadas al inicio del proyecto Emisario Submarino porque al transcurrir un año y 9 meses no se ha alcanzado la calidad Excelente que estimó valores hasta 95 en la simulación, sobre todo en la zona Norte. De esta manera, se infiere que la calidad del agua seguirá mejorando para posteriores años.

Palabras Clave: Ciénaga de la Virgen, Calidad del Agua, Emisario Submarino, Índices de Calidad, Normas Colombianas, Análisis Tendencial, Sistema de Información Geográfica, Uso.



Abstract

The main objective of this research is analyze the variation of water quality of the Ciénaga de la Virgen de Cartagena de Indias, from 1999 until the construction and operation of the outfall in 2013. This because it is very important to contribute to the recovery and preservation of the estuary, as it provides an environment that can be exploited for both recreational and commercial. This research was conducted documental - descriptive, where the historical variation in water quality of the estuary was analyzed by means of averages in times of drought, rain transition in terms of quality levels, from the collection of secondary data, basically related to monthly sampling of physico-chemical and microbiological parameters at different points located along the same; and two quality indices (ICA and ICAM) were calculated as well as some statistical measures of position and dispersion. Thus it was found that on average, before the implementation of Outfall Water Quality Media Swamp was a minimum value of 55, and after its construction became good category with a maximum value of 85.7. Moreover, according to Colombian standards in force was obtained which is suitable for Primary Contact but regarding thermotolerant coliforms 2014 two critical points are identified with values up to 2031.8 MPN / 100 ml. Finally a trend analysis was performed from GIS using ArcGIS software, and compared with mathematical modeling by ACUACAR in 2003 found that has not been fully met the goals outlined at the beginning of Outfall project that be one year and 9 months was not achieved Excellent quality that estimated as 95 in the simulation, especially in the north. Thus, it follows that water quality will continue to improve for subsequent years. This because it is very important to contribute to the recovery and preservation of the estuary, as it provides an environment that can be exploited for recreational and commercial. The historical variation of water quality of the estuary was analyzed from the collection of secondary data, basically related to monthly sampling of physicochemical and microbiological parameters in different points located along the same; two quality indices (ICA and ICAM) were calculated as well as some statistical measures of location and dispersion. Thus it was found that on average, before the implementation of outfall water quality of the marsh was Media, and after its construction became Good category. Furthermore, according to Colombian standards was obtained that



is suitable for Primary Contact. Finally, a trend analysis was performed from GIS using ArcGIS software, and when it was compared with Mathematical modeling by ACUACAR in 2003, it was found that the estuary has not been achieved excellent quality that it's demonstrated in the simulation, especially in the North. Thus, it follows that water quality will continue to improve for subsequent years.

Keywords: *Ciénaga de la Virgen, Water Quality, Outfall, Quality Indices, Colombian standards, Trend Analysis, GIS, Use.*



2. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Cartagena de Indias posee gran diversidad de ecosistemas marinos y de agua dulce, lo que la convierte en una de las ciudades más importantes de Colombia, debido a los numerosos beneficios que representan para la sociedad, y las funciones ecológicas y ambientales de los mismos. Está rodeada principalmente por tres cuerpos de agua: la Bahía de Cartagena, la Ciénaga de la Virgen y el Mar Caribe, los cuales se convierten en la base de diferentes actividades productivas y socioculturales, tales como la pesca, el transporte, el embarque, el turismo y la asimilación de desperdicios (Maldonado, Baldiris, & Díaz, 2011).

A pesar de ello, dichos ecosistemas marino-costeros presentan altos niveles de contaminación por la disposición de las aguas residuales (domésticas, lluvias e industriales) de la ciudad, ya que dichos vertimientos se han realizado desde el inicio de su sistema de alcantarillado. Aproximadamente el 40% de las aguas servidas eran vertidas en la Bahía y el 60% dispuestas en la Ciénaga (CARDIQUE & Conservación Internacional Colombia, 2004). De modo que, la disposición de estas aguas sobre la laguna costera y la capacidad reducida de intercambio de las mismas provocó un gran deterioro del estuario, presentándose condiciones de malos olores, eutrofización, mortandad de peces, pérdida de su capacidad de auto regeneración y a su vez, riesgos en el bienestar y la salud de la población asentada en sus orillas y sus zonas de influencia (Martínez & Arrieta, 2007).

Por otra parte, con el fin de mejorar los servicios de abastecimiento de agua y alcantarillado de Cartagena, las condiciones sanitarias de la población de menores recursos de la ciudad y facilitar la limpieza de las masas de agua que la circundan, entre ellas la Ciénaga, se han realizado distintos estudios tanto por entes gubernamentales y locales como por personas naturales. Entre ellos se destacan la *Modelación Hidrológico y Ambiental de la Ciénaga de la Virgen* (Mouthon Bello, 1988), donde se analizaron distintas alternativas sobre cómo manejar la Ciénaga; *Evaluación de la calidad del agua en la Ciénaga de la Virgen (Cartagena, Colombia) durante el período 2006-2010* (Maldonado, Baldiris, & Díaz, 2011),



estudio referente a la evolución de la calidad del agua de la Ciénaga durante un período de cuatro años; entre otros.

Además, con el fin de dar solución a los problemas presentados en el estuario, en el año 2000 inició el funcionamiento de una boca artificial denominada *Bocana Estabilizada de Mareas*, la cual a partir del intercambio de volumen de agua del mar con el de la Ciénaga permitiría mejorar su capacidad de autorregulación y por lo tanto la calidad del agua, aumentando así los niveles de oxigenación y salinidad (Maldonado, Baldiris, & Díaz, 2011). Posteriormente, se propuso desarrollar el Plan Maestro del Alcantarillado en el Distrito de Cartagena, cuya entidad a cargo era ACUACAR, y cuyos objetivos principales comprendían la eliminación de los vertimientos de agua residual a la Bahía y a la Ciénaga de la Virgen, y la construcción de una descarga submarina al Mar Caribe en Enero de 2013 (*Emisario Submarino*) para disponer los residuos líquidos domésticos generados dentro de la ciudad (Gómez, 2003).

La Ciénaga de la Virgen, ubicada al nororiente de la ciudad de Cartagena en las coordenadas 10° 26' 45" Latitud Norte y 75° 29' 40" Latitud Oeste, es un recurso hídrico que representa un gran beneficio para la comunidad residente y visitante, puesto que ofrece un ambiente que podría ser aprovechado tanto para actividades recreativas (natación y otros deportes acuáticos) como comerciales (pesca, transporte, embarque, turismo, entre otros). Con ello, se evidencia la importancia que contribuye la recuperación de las masas de agua para mejorar la calidad de vida de los residentes, resultando esencial preservar y restablecer la calidad del agua de las mismas, y así evitar los riesgos de salud pública de comunidades aledañas y turistas. Con base en esto, puede surgir la inquietud con respecto a la mejora de la calidad del agua de la Ciénaga luego de la construcción y operación de la Bocana Estabilizada de Mareas y el Emisario Submarino.

He aquí donde se evidencia la importancia de la presente investigación, cuyo objetivo principal es realizar un análisis de la variación de la calidad del agua de la Ciénaga. Esto genera grandes beneficios a las personas vinculadas con el estuario puesto que confirmaría que las condiciones en las que se encuentra el cuerpo de agua son adecuadas para permitir



algún tipo de contacto, ya sea primario o secundario. Al reducir la contaminación y los riesgos para la salud pública, se fomenta el turismo en la región generando empleo y oportunidades económicas para las comunidades de la Zona Norte, lo que conlleva una reducción de la pobreza, mejora en la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones de la ciudad y un aumento en la competitividad del territorio.

Ahora bien, considerando que la Universidad de Cartagena ha realizado estudios previos relacionados con la temática, el proyecto propuesto aportaría registros y estudios actualizados hasta el 2014 al seguimiento que se le ha hecho a dicho cuerpo de agua, manteniendo así la institución a la vanguardia, teniendo en cuenta que no se han realizados estudios posteriores a la operación del emisario.

Para la ejecución de este proyecto se contó con información suministrada por la Entidad Pública Ambiental de la Ciudad de Cartagena (EPA), la cual toma registros de parámetros físico-químicos y microbiológicos evaluados en la Ciénaga desde el año 1999 hasta la actualidad. Así mismo la sociedad Aguas de Cartagena (ACUACAR), empresa encargada de los servicios públicos de Acueducto y Alcantarillado de la ciudad, suministró a los autores los parámetros históricos evaluados mensualmente después y previo a la construcción del Emisario Submarino. Adicionalmente, proporcionó los resultados esperados tras la modelación matemática realizada en el año 2003 empleando el software MIKE 21, puesto que se esperaba construir la estructura en el 2005 (Aguas de Cartagena S.A., 2002).

Para la interpretación adecuada de los datos, fue necesario valores simultáneos de estudios hidrodinámicos, físico-químicos y microbiológicos (suministrados por el Doctor Alfonso Arrieta, director actual del Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental), debido a que ciertos factores hidrodinámicos podían modificar notoriamente los resultados esperados y era menester conocer el comportamiento dinámico del cuerpo de agua en diferentes épocas, involucrando las de sequía e invierno.



A partir de la información suministrada se realizó una comparación de los valores obtenidos para cada uno de los parámetros estudiados históricamente en la Ciénaga con los establecidos como ideales según las metas fijadas al inicio del proyecto Emisario Submarino. Es menester mencionar que los autores se restringieron al análisis de la información suministrada por el Establecimiento Público Ambiental (EPA) y Aguas de Cartagena, es decir, los autores no realizaron ni la toma de muestras en campo ni el estudio detallado en el laboratorio. Asimismo, se sistematizaron los resultados del análisis espacial y descriptivo de la calidad de agua de las muestras recolectadas en el estuario, mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el uso del software ArcGIS, esto con el fin de determinar las condiciones generales del agua y mapear su distribución espacial.

Este proyecto como producto final suministra un conjunto de gráficas que representan la variación histórica de distintos parámetros físico-químicos y microbiológicos tomados en la Ciénaga desde 1999 hasta la actualidad; una serie de mapas que zonifican el estuario dependiendo a la calidad del agua, a partir del cálculo de los índices de calidad ICA NSF e ICAM; y por último, la determinación del uso que puede tener el cuerpo de agua según las normas colombianas. Por otra parte, en el campo profesional se evaluaron las diferentes características adoptadas por la Ciénaga, tras las intervenciones con estructuras hidráulicas como la Bocana Estabilizada de Mareas y el Emisario Submarino, o intervenciones humanas como la eliminación de los vertimientos de agua residual bajo las condiciones socioculturales que afectan directamente a la mejoría de la misma.

Finalmente, es importante mencionar que este Trabajo de Grado se realizó desde Febrero hasta Septiembre del año 2014, y está enmarcado en la línea de investigación Saneamiento Ambiental del grupo de investigación MODELACIÓN AMBIENTAL de la Universidad de Cartagena. Esto se debe a que se analizó la variación de la calidad del cuerpo de agua de la Ciénaga con el fin de comprobar su mejoramiento a raíz de la eliminación de vertidos de aguas residuales, lo cual corresponde a un problema de saneamiento ambiental.



3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 ANTECEDENTES

En el año 1988, se presenta un proyecto de maestría llamado *Modelación Hidrológico y Ambiental de la Ciénaga de la Virgen* (Mouthon Bello, 1988) en el cual, se desarrolla un modelo para analizar distintas alternativas de cómo manejar la Ciénaga. Se empleó el método de la cantidad de movimiento para hacer el modelo hidrológico de la interacción de la Ciénaga con el mar, y para modelar la calidad del agua se utilizaron diferencias finitas de las ecuaciones de difusión y dispersión.

En la modelación de la calidad del agua se consideran tres alternativas de solución. La primera referente al retiro de las cargas de alcantarillado, donde se obtuvieron buenos resultados por la remoción de la DBO, DBON y fósforo. El segundo pretendía un dragado de los lodos del fondo, éste arrojó buenas concentraciones de oxígeno pero sobrepasó el OD de los niveles de saturación. Y el último, considera una comunicación con el mar, en el cual se nota una remoción de contaminantes como el fósforo, DBO y DBON por la asimilación del mar a contaminantes, pero los niveles de oxígeno no son suficientes debido a que éste es consumido por las algas y los lodos bénticos (Mouthon Bello, 1988).

Es así como el ingeniero Mouthon (1988) llega a conclusiones tales como que la presencia de nutrientes como el fósforo debido a las descargas de aguas residuales de la ciudad de Cartagena en la Ciénaga, generan en ésta el crecimiento excesivo de algas que al morir se asientan en el fondo liberando fósforo utilizado por las vivas. De esta forma es como explica la creación de demandas de oxígeno necesarias para degradar las algas muertas y utilizadas por el proceso de respiración de las algas vivas.

El documento *Respuesta de la Administración del Banco a la Solicitud de Someter al Examen del Panel de Inspección El Proyecto de Abastecimiento de Agua, Alcantarillado y Ordenación Ambiental de Cartagena (Colombia) - (Préstamo No. 4507-Co)* menciona dentro



de los objetivos del proyecto mejorar los servicios de abastecimiento de agua y alcantarillado de la ciudad y las condiciones sanitarias de la población de menores recursos, y facilitar la limpieza de las masas de agua que la circundan, entre ellas la Ciénaga de la Virgen. Lo anterior mediante la captación, el tratamiento y la eliminación de la totalidad del caudal de aguas servidas de la ciudad (Banco Internacional de Reconstrucción y Desarrollo (BIRD), 2004).

De acuerdo con el BIRD (2004):

Desde una perspectiva técnica, económica, ambiental y social, la solución óptima para la eliminación de las aguas residuales de Cartagena consistía en el tratamiento preliminar y la construcción de un Emisario Submarino que desaguara en el Mar Caribe. Para determinar cuál era el mejor sitio de vertimiento se utilizaron estudios oceanográficos. Después de analizar la velocidad y dirección del viento y de las corrientes marinas, la carga de coliformes en las aguas residuales y las velocidades de decaimiento bacteriológico, se escogió Punta Canoa, situada unos 20 km al norte de Cartagena. Si bien se encuentra ubicado a gran distancia de la ciudad, este sitio resultó la opción más económica porque allí la pendiente del lecho marino es bastante pronunciada, de modo que, para llegar a aguas relativamente profundas, sería suficiente que el emisario tuviera una longitud de sólo 2,85 km. (p.17)

En un informe presentado por el *Comité Directivo de 'Cartagena Cómo Vamos'* (CCV) se presentó información completa e indicativa acerca del estado del medio ambiente relacionada específicamente con la calidad del agua y del aire en la ciudad de Cartagena, a partir de información suministrada por los entes responsables de la política ambiental: EPA y Cardique (Cartagena Cómo Vamos, 2008).

Con base en los datos suministrados por las entidades ambientales, Cartagena Cómo Vamos (2008) publicó lo siguiente:



En la Ciénaga de La Virgen el DBO5, los coliformes fecales y totales estuvieron por encima de los parámetros deseables. El oxígeno disuelto y la concentración de amonio y fósforo fueron normales. Resulta preocupante en este caso, que con respecto a la última medición del Laboratorio de la Bocana de la que CCV tiene registros (2006), los coliformes totales presentaron una variación significativa a empeorar. De un promedio de 37.104 por cada 100 mililitros en 2006, pasaron a 106.071 en 2008. Resulta especialmente preocupante este caso, dado que este cuerpo de agua debería estar registrando una mejoría progresiva a raíz de la obra de la Bocana. (p.42)

Es importante mencionar que la planeación para la construcción de la Bocana Estabilizada de Mareas se inició en los años 90. En 1994 el Ministerio de Colombia y el Gobierno de Holanda aportaron los recursos para el inicio de la obra; pero sólo hasta el 25 de marzo de 1999 la firma holandesa Boskalis Internacional, inició los trabajos con la interventoría de Haskoning. Así, el 25 de noviembre de 2000 comenzó a ingresar y a salir agua del Mar Caribe a la Ciénaga cada 24 horas, con las mareas que empujan las distintas compuertas –seis al ingreso y cuatro a la salida- (El Universal, 2013). Según (Beltrán, 2003) “su principio de operación se basa en la oxidación de la materia orgánica proveniente de las aguas residuales de la ciudad a través procesos biológicos aerobios; logrando así, autodepurar el medio acuático por la asimilación de los nutrientes”. De modo que, al influir el agua marina en las características fisicoquímicas de la Ciénaga, estabilizando la salinidad, se propicia un medio no apto para la permanencia y desarrollo de coliformes.

Por otra parte, con referencia a su funcionamiento no se registran ni en noticias ni por parte de entidades reguladoras del mismo, eventos externos al sistema que hayan obligado el cierre parcial o temporal de las compuertas. No obstante, con el Fenómeno de la Niña durante los años 2010 y 2011, las fuertes lluvias que se registraron, generaron un aumento en el nivel del agua de la Ciénaga por las inundaciones, tanto así que el agua se desbordó por encima de la estructura de las compuertas y a su vez no había control en la pantalla de dirección para regular el flujo del mismo. Además en distintas ocasiones a lo largo de los años, se han cerrado temporalmente alguna de las compuertas de entrada de agua de mar a la Ciénaga para



facilitar el desagüe de mayores caudales de escorrentía en barrios aledaños a la zona sur del estuario (Blanco, 2014).

Luego de la construcción y operación de la Bocana Estabilizada de Mareas, se realizó un estudio referente a la evolución de la calidad del agua de la Ciénaga durante un período de cuatro años, dicho artículo fue titulado *Evaluación de la calidad del agua en la Ciénaga de la Virgen (Cartagena, Colombia) durante el período 2006-2010*, (Maldonado et al., 2011).

Los parámetros fisicoquímicos monitoreados para evaluar la calidad del agua y verificar la efectividad del sistema implementado, fueron los siguientes: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Oxígeno Disuelto (OD) y Coliformes Totales. Y dentro de los microbiológicos se analizó el Fósforo Total (Maldonado et al., 2011). Es menester mencionar que todos los análisis fueron realizados en el laboratorio de calidad ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (Cardique), que está acreditado por el IDEAM según la Norma NTC 17025.

Luego de la comparación entre los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros estudiados y las metas de las propiedades fisicoquímicas del agua relacionadas con el proyecto Bocana Estabilizada de Mareas de la Ciénaga, así como también con lo que dicta la Norma Colombiana relacionada con este tipo de aguas (Decreto 3930 de 2010); los resultados mostraron que sólo uno de los cuatro puntos estudiados cumplía con todas las metas establecidas. Sin embargo, el OD estuvo dentro del límite establecido en todos los puntos evaluados. Los valores de coliformes totales en dos de los puntos estuvieron por encima de los límites. Es así, como Maldonado et al. (2011) determinaron que era urgente mejorar la gestión de descarga de aguas residuales, principal fuente contaminante en el cuerpo de agua del estuario.

En el *Análisis de Línea Base sobre el Manejo de las Aguas Residuales Domésticas en la Región del Gran Caribe* se expone un estudio preliminar realizado en algunos países del Caribe (entre ellos Colombia), sobre el manejo de las aguas residuales domésticas en



ecosistemas marino-costeros contaminados y el diseño de un plan de manejo para su rehabilitación ambiental en el marco del proyecto “Caribbean Revolving Fund for Wastewater Management” conocido como CreW (Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas (Cimab), 2010).

En el informe, Cimab (2010) indicó que:

En la zona de la Ciénaga de la Virgen y el Cerro de la Popa la infraestructura habitacional se encuentra depauperada y aunque existe un colector de aguas residuales domésticas, los bajos ingresos de gran parte de la población residente, la insuficiente concientización ambiental y la dificultad de acceso al colector, restringe su conexión y vierten directamente sus aguas residuales domésticas sin tratar a la Ciénaga o a los canales interiores. Unido a esto, muchas viviendas no cuentan con ramales interiores para la evacuación de sus aguas residuales. (p.15)

Desde el año 2005, se propuso garantizar el uso sostenible de la Ciénaga por medio de un plan de ordenamiento y manejo, a raíz de un convenio entre Cardique y Conservación Internacional. Luego de la construcción del sistema de regulación hídrica (Bocana Estabilizada de Mareas) construido por los gobiernos de Colombia y Holanda en el año 2000, la laguna costera logró recuperarse en más de un 80%. Además, el Plan Maestro de Alcantarillado de Cartagena prevé la terminación de un nuevo emisario submarino que evacuaría las aguas residuales domésticas (Cimab, 2010).

En el *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) de la Ciénaga de la Virgen* desarrollado en el año 2004 (CARDIQUE & Conservación Internacional Colombia, 2004), se proporcionan los elementos necesarios para hacer la planificación y el ordenamiento de la cuenca, así como los programas y proyectos de conservación, preservación y restauración necesarios, con el fin de lograr un adecuado manejo y administración de los recursos naturales renovables, así como su uso sostenible por parte de las poblaciones humanas que allí se asientan.



De acuerdo con el diagnóstico analítico preliminar y la jerarquización de distintas variables se identifican 15 problemáticas agrupadas en tres aspectos (socio-económico, biológico-ecológico e institucional), resaltando entre ellas la contaminación por aguas servidas y por residuos sólidos, invasión del cuerpo de agua, inadecuados patrones culturales y falta de coordinación inter e intrainstitucional (CARDIQUE & Conservación Internacional Colombia, 2004).

En el documento se señala, entre otras cosas, la importancia de definir un caudal ecológico, referente según (CARDIQUE & Conservación Internacional Colombia, 2004) al agua reservada que permita preservar hábitats naturales que cobijan una riqueza de flora y fauna, parques naturales y diversidad de paisajes. Y que basado en el principio de “precaución ambiental” –invocado por la ley 99 de 1993- será como mínimo del 50% del caudal medio anual que se establezca en el sitio de cada aprovechamiento. Esto debido a la ausencia de estudios y procedimientos legales específicos en Colombia relacionados con la temática, y ante la imposibilidad de contar con registros específicos de caudal en series diarias, mensuales y anuales de las principales microcuencas del humedal.

Por último, los programas y proyectos formulados buscan: restaurar las condiciones naturales, mejorar las condiciones hidráulicas e hidrológicas, recuperar el espacio público, establecer condiciones para la recreación, la educación ambiental y la investigación científica, restablecer los procesos ecológicos y asegurar la apropiación ciudadana e institucional. Entre ellos se encuentran: la administración del agua, manejo integral de los recursos naturales, el ordenamiento, preservación y conservación, entre otros (CARDIQUE & Conservación Internacional Colombia, 2004).

A finales del año 2011, la Contraloría Distrital de la ciudad de Cartagena presenta un informe Macro de Control Fiscal Ambiental vigente entre los años 2008 y 2010 llamado *Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente*, en el cual se expone el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado de la ciudad donde se abarca el Emisario Submarino para el saneamiento de la Bahía y la Ciénaga. Luego, de evaluar todas las alternativas propuestas, se



escoge un tratamiento preliminar, ubicado en el corregimiento Punta Canoa para la disposición final de efluentes en el Mar Caribe (Contraloría Distrital, 2011).

El proyecto es contemplado en 3 etapas. La primera consiste en verter el agua residual al Caño Limón que desemboca en la Ciénaga mientras entra en operación el emisario. La siguiente vincula mejoras en la estación de bombas el Paraíso, e instalación del tratamiento preliminar y de todas las tuberías hasta el difusor. Y la última, pronosticada entre el año 2015 – 2025 se refiere a ampliaciones tanto en el tratamiento como en tuberías de conducción para amortiguar incrementos de caudal por aumentos en la población (Contraloría Distrital, 2011).

Entre las ventajas que se esperan conseguir con el sistema propuesto, se encuentran: la capacidad de asimilación de contaminantes del Mar Caribe, lugar del tratamiento biológico; la no afectación de la zona costera utilizada por bañistas; pesca y navegación (contacto secundario) en la zona de mezcla alrededor del difusor del emisario, regeneración de la Ciénaga para contacto primario (natación) y minimización de los riesgos para la salud pública. Cabe resaltar, que a su vez se pueden generar impactos relevantes tales como olores por la operación de tratamiento con desarenado y tamizado, incremento en la economía local y asentamiento en el fondo marino de los sólidos sedimentables no removidos de las aguas residuales generando aumento de coliformes fecales alrededor del difusor del emisario (Contraloría Distrital, 2011).

3.2 ESTADO DEL ARTE

En el artículo *Calidad y Aprovechamiento del Agua de la Laguna Unamuno (Buenos Aires, Argentina)* se describe el análisis realizado en el cuerpo hídrico, luego de la recolección de datos edafológicos y meteorológicos, y la medición de parámetros físicos de muestras de agua en superficie y a profundidad, de modo que la calidad del agua fuese evaluada desde los puntos de vista biológicos, químicos y físicos, con el fin de determinar las posibilidades de aprovechamiento del mismo (Yael Bohn, Perillo, & Pícolo, 2004).



Según Yael Bohn et al. (2004):

Es recomendable utilizar el agua de la laguna para riego suplementario sólo en suelos bien drenados y con cantidades de agua cuyo volumen permita el lavado de los suelos. En cuanto a su consumo por parte del ganado, el agua es apta desde una perspectiva química. Sin embargo, es recomendable que las cantidades ingeridas sean pequeñas para evitar efectos secundarios en la salud de los animales. (p.182)

Cabe destacar que el estudio realizado por Yael Bohn et al. (2004) en la laguna, está basado en la medición de los parámetros realizada en siete estaciones, seis de ellas ubicadas dentro del cuerpo de agua y la restante en el arroyo afluente. La información obtenida fue organizada en tablas para el posterior análisis químico, físico y biológico; y para clasificar la aptitud del agua se empleó el diagrama de Scholler. Una representación gráfica que muestra las características químicas principales del agua permitiendo estudiar evoluciones temporales que ésta presente en un mismo punto (Lillo, 2007).

En un artículo titulado *Variabilidad fisicoquímica del agua en la Ciénaga El Eneal, reserva natural Sanguaré municipio de San Onofre-Sucre, Colombia* se publicó un estudio realizado en el estuario, con el que se describen las características físico-químicas del mismo, especialmente las limnológicas, a través del estudio de parámetros tales como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH, la conductividad eléctrica y la salinidad en columnas de agua, a través de un diseño nictemeral, es decir de 24 horas. (Ríos, Palacio, & Aguirre, 2008).

Para la medición de dichos parámetros se escogieron cuatro muestreos de campo incluyendo períodos de lluvia y sequía. Las mediciones se realizaron durante 24 horas a intervalos de tres horas, y a cada veinte centímetros de profundidad. De acuerdo con Ríos et al. (2008):

Se encontró que el sistema es un ambiente completamente mezclado desde el punto de vista térmico debido a la acción de los vientos, de su morfología y de su ubicación cerca de la línea costera. También, se halló que esta Ciénaga costera es un ambiente



oligohalino en época seca; sin embargo, la mayor parte del tiempo el sistema puede considerarse como un ambiente limnético. En épocas prolongadas de sequía, la salinidad alcanzó su valor máximo de 3,4 ppm, lo cual podría constituir un factor limitante para comunidades de organismos estrictamente limnéticos. (p.39)

Ríos et al. (2008) menciona que el análisis de la información consistió en univariar las variables fisicoquímicas. De modo que, se calcularon medidas de tendencia central (media, percentiles) y variabilidad (varianza, rango), y se construyeron mapas y figuras que permitieron conocer propiedades importantes en la distribución, tales como la presencia de asimetrías y valores atípicos, además de comparar las distribuciones en las diferentes estaciones.

Un artículo llamado Influences of urban wastewaters with the stream water quality: a case study from Gumushane Province, Turkey, en el cual se menciona la importancia que radica el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento, en impactos negativos tanto para el medio ambiente como para la salud de los seres humanos, debido a que en la ciudad de Gumushane en Turquía, lugar de estudio, eran vertidas las aguas residuales urbanas en cuerpos de agua, ríos, arroyos, lagos naturales o artificiales. (Bayram, Önsoy, Numan Bulut, & Akinci, 2012)

Por ello se realizó un estudio de medición de indicadores de la calidad del agua como lo son el DBO, amonio, nitrito, nitrato, nitrógeno total, fósforo, MBAS, temperatura del agua, pH, OD y conductividad eléctrica. El monitoreo realizado durante un año, arrojó que algunos parámetros no tuvieron grandes variaciones como T, pH, DO y EC. Los demás variaron de forma dramática inmediatamente aguas abajo de la descarga de Aguas Residuales por el cambio de la dinámica del agua en las estaciones de verano y otoño. El análisis de los datos se realizó a partir de una correlación entre dos o más variables con Statistical Package for Social Sciences, versión 11.5 de Windows. (Bayram, Önsoy, Numan Bulut, & Akinci, 2012). Es así, como se concluyó que el agua estudiada estaba altamente contaminada y sobre todo por el alto contenido de nitrógeno amónico. A su vez, las altas concentraciones de fósforo y nitrógeno generan los agresivos crecimientos de algas sumergidas (Bayram, Önsoy, Numan



Bulut, & Akinci, 2012). Los resultados fueron presentados tanto en matrices de correlación, como en gráficas que muestran la variación de los parámetros para cada uno de los meses durante el periodo de estudio en tres puntos específicos: aguas arriba, aguas abajo y en el punto de descarga.

A pesar de que la ciudad de Gumushane (Turquía) cuenta con diferentes estaciones, con inviernos fríos y nevados y con veranos calurosos y húmedos, y que en la temporada de verano (julio y agosto) las temperaturas al mediodía generalmente superan los 30° C, y en invierno suelen caer en picada a -10° C (Oficina Comercial de Ecuador en Ankara, 2013), el vertimiento de las aguas residuales urbanas en los cuerpos de agua sin ningún tratamiento, provocó el interés en investigar los crónicos impactos ocasionados tanto al medio ambiente como a los seres humanos habitantes de la ciudad, a partir del estudio de las diferentes variables físico-químicas y microbiológicas del agua, del cual se puede tomar como referencia la metodología empleada y los resultados a los que llegaron.

Un artículo llamado Physico-chemical parameter evaluation of water quality around Chandrapur District Maharastra, India muestra el estudio de la calidad del agua del principal río que rodea el distrito de Chandrapur conocido como Wardha. El monitoreo se realiza tanto aguas arriba como aguas abajo durante Septiembre 2011 hasta Agosto 2012 para determinar el nivel de polución del agua (Tambekar, Morey, Batra, & Weginwar, 2013).

Se concluyó que los altos valores de parámetros físico-químicos como el pH y la turbiedad, indican contaminación en el área de estudio. Esto se debe a que tanto los desechos domésticos, alcantarillas municipales, efluentes industriales y escorrentía de zonas de agricultura, son responsables directos o indirectos del deterioro de la calidad del agua. El análisis mostró los resultados a partir de una evaluación estadística que incluía el método de valores medios, desviación estándar, varianza estándar, error estándar y 95% de límite de confiabilidad. A su vez, fueron empleadas diagramas de barra para mostrar la variación de las concentraciones de los diferentes parámetros y fueron calculados coeficientes de correlación entre los mismos. Los resultados arrojaron que la calidad del agua no cumplía



con los estándares de la Organización Mundial de la Salud (WHO) y el Departamento de Estándares de India (BIS) (Tambekar et al., 2013).

Ahora bien, aunque el cuerpo de agua estudiado es un río que bordea distritos como Chandrapur y Gadchiroli con distancias aproximadas de 80 km, más no es un cuerpo de agua estuarina, el período de estudio comprende tres estaciones: anterior, durante y posterior al Monzón (Monsoon), referido a épocas de grandes vientos, la metodología empleada y las conclusiones obtenidas en el estudio se pueden utilizar como referencia para la investigación planteada en este proyecto.

En un artículo titulado *Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad del agua en un Sistema de Información Geográfica*, se establecen los procedimientos metodológicos necesarios para llevar a cabo la integración de un modelo de calidad del agua, orientado al estudio de sustancias prioritarias y peligrosas, dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), aplicado al Río de San Martín y el Río de Huelva en España (Sámano Celorio, 2011).

En el artículo se señala información relacionada con el modelado numérico de sistemas estuarinos y sobre las potencialidades y funcionalidades propias de un SIG, así como las posibilidades de integración de ambas herramientas. Esto debido a que los modelos numéricos mantienen un punto débil en términos de la limitada precisión que ofrecen en cuanto a la localización de las zonas afectadas en la realidad física, y es ahí donde intervienen herramientas capaces de llevar a cabo análisis espaciales, como los SIG, los cuales proporcionan además de una interfaz amigable para su uso, extraordinarias capacidades de visualización y una mayor precisión espacial (Sámano Celorio, 2011).

En resumen, para el desarrollo del presente proyecto se tomó como referencia las metodologías y algunos apartes de los análisis de resultados de los artículos anteriormente mencionados, debido a que dichos estudios fueron similares al realizado.



3.3 MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo del presente proyecto fue necesario tener en cuenta algunos conceptos y teorías necesarias para el análisis del cuerpo de agua, mostradas a continuación.

3.3.1 Análisis Físico, Químico y Bacteriológico de las Aguas Naturales

Es importante conocer la actividad física, química y bacteriológica que prevalecen en las aguas naturales y residuales, y como puede emplearse la ciencia para determinar si es apta para el consumo humano (Baird, 2004). La descripción de cada uno de los análisis antes mencionados se realizará con base en conceptos extraídos del libro *Calidad del Agua*, cuyo autor es Jairo Romero Rojas.

3.3.1.1 Análisis Físico

Entre las propiedades físicas que definen el agua natural, se encuentran principalmente turbidez, color y conductividad. La primera, producida por la suspensión de gran variedad de materiales que varían en tamaño desde coloidales hasta partículas gruesas, es una propiedad óptica de la interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra. La *turbidez* permite determinar la potabilidad del agua.

Presencia de elementos como el hierro y el manganeso en el agua, son los causales más comunes de su *color*, así como también el contacto con desechos orgánicos, hojas, maderas, raíces, etc. A pesar de que el grado del color es objetable por el consumidor, la determinación del mismo es importante para evaluar las características del agua y su fuente de color.

En el análisis de aguas un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos es el valor de la *conductividad*. Es así, como la conductividad mide la habilidad para transportar una corriente eléctrica ya que depende de la concentración de sustancias disueltas ionizadas. Otro parámetro importante son los *sólidos suspendidos totales*, éstos evalúan la concentración o fuerza de aguas residuales. Es de esperarse que en aguas potables la cantidad de sólidos en suspensión sea mínima.



3.3.1.2 Análisis Químico

La determinación de *oxígeno disuelto* es muy importante para determinar la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Adicionalmente, sirve para cuantificar DBO, tasas de aireación en los procesos de tratamiento y grado de polución de los ríos. Su contenido depende de la concentración y estabilidad del material orgánico presente y es por ello de gran importancia para la auto-purificación de los ríos.

La oxidación de la materia orgánica es una de las principales reacciones que ocurren en los cuerpos naturales de agua y su medida conocida como *demanda bioquímica de oxígeno (DBO)* constituye la demanda de oxígeno usada por microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable en condiciones aeróbicas. La *demanda química de oxígeno (DQO)* es un parámetro químico de polución, el cual mide la cantidad de material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. En aguas residuales domésticas típicas se presenta relaciones de DQO/DBO iguales a dos. Dichos valores son utilizados en el análisis de aguas residuales ya que permiten determinar la biodegradabilidad, contenido de sustancias tóxicas y la eficiencia de unidades de tratamiento.

La *Concentración de iones de hidrógeno (pH)* es la actividad del ion hidrógeno. Se usa para expresar la intensidad alcalina de una solución, sin que quiera decir que mida la alcalinidad o acidez total. Es considerada en el suministro de aguas en la desinfección, el ablandamiento y el control de corrosión.

Los compuestos del nitrógeno son de gran interés debido a la importancia en los procesos vitales de plantas y animales. Se considera que un agua de polución reciente y por consiguiente de gran peligro potencial, contiene *nitrógeno orgánico y amoniacal*. En aguas superficiales, los riesgos para la salud decrece con la edad de polución o de auto purificación, y con la temperatura. Un incremento súbito del contenido de nitrógeno amoniacal de un agua implica la presencia de contaminación de aguas residuales, y además altas concentraciones de hierro, color y cloro.



En 1940 se descubrió que las aguas con alto contenido de *nitratos* producen enfermedades en niños menores de tres años en la que el oxígeno que toman convierte la sangre arterial en sangre venosa, dándole así un color azul en la epidermis del infante.

En aguas residuales, la cantidad de *sulfatos* es importante determinarla debido a que puede producir problemas de olor desagradable (huevo podrido), gas tóxico y causal de muerte al personal de mantenimiento, corrosivo para las alcantarillas, entre otros. La cantidad de *sulfuros* también se presenta en aguas residuales domésticas e industriales, y en aguas superficiales. Éstas incrementan la demanda de cloro haciendo más difícil el tratamiento aeróbico, causan malos olores, corrosión y producen atmósferas letales en los alcantarillados.

Por otra parte, el *fósforo* es un nutriente que controla el crecimiento de algas, pero un exceso del mismo produce un desarrollo exorbitado de plantas lo cual es inadecuado para el beneficio de un cuerpo de agua. Ahora bien, su determinación es necesaria para estudios de polución en ríos, lagos y embalses. La descarga de 1 g de fósforo en un lago puede producir más de 100 g de biomasa, la cual puede representar una DBO de 150 g de oxígeno para su oxidación aeróbica.

3.3.1.3 Análisis Bacteriológico

El análisis bacteriológico del agua es vital en la prevención de epidemias producto de su contaminación, cuyo estudio no implica la determinación directa de gérmenes patógenos, si no la determinación de presencia fecal pertenecientes al grupo *coliforme*. Su presencia en el agua debido a la elevada secreción diaria por habitante, se considera como un índice evidente de polución fecal y por lo tanto de contaminación con organismos patógenos.

A razón de que los coliformes no sólo provienen de humanos sino también de animales y en el suelo; la presencia de coliformes en aguas superficiales obedece a contaminación por residuos humanos, animales o erosión del suelo, separadamente o combinación de las tres fuentes.



Es menester mencionar que la importancia del análisis bacteriológico no solo radica en detectar la presencia de organismos coliformes, sino además identificar el conocido número más probable por unidad de volumen en el agua, ya que dicho número es la densidad más probable en producir un resultado en particular.

3.3.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Según Ingeniería y Tecnología al Servicio de Colombia (INGTEC) (2012), un Sistema de Información Geográfica es una herramienta que permite resumir información geográfica con una representación lógica y visualmente eficiente, a partir de la compilación de datos espaciales que pueden ser localizados en un mapa o georreferenciados.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son sistemas especializados en el manejo y análisis de información que representan la realidad geográfica. Sus funciones básicas pueden resumirse en: entradas de información, manipulación, análisis y salidas de datos. Estos sistemas están siendo ampliamente aplicados a la gestión de recursos costeros puesto que proveen al gestor con una herramienta, cada vez más sofisticada, capaz de realizar, por ejemplo, análisis de sensibilidad, modelado de hábitats y control de la contaminación (Sámano Celorio, 2011).

Dentro de un SIG, la introducción de los datos puede llevarse a cabo por digitalización directa, a través de coordenadas almacenadas en ficheros digitales, e incluso, por teledetección. En cuanto a la manipulación de los datos, es posible, por ejemplo, transformar matemáticamente coordenadas, así como reformatear, importar o exportar datos. No obstante, cabe destacar que la funcionalidad más importante de estos sistemas es el componente de análisis. Dicho componente cuenta con funciones tales como: selección geográfica y de rutas óptimas, análisis de proximidad y superposición cartográfica. La salida de datos consiste en una representación gráfica y cartográfica (Sámano Celorio, 2011).

Un Sistema de Información Geográfica es el ArcGIS. Éste es un sistema completo para el diseño y gestión de soluciones a través de la aplicación de conocimientos geográficos, el cual permite hacer un análisis profundo, obtener una mayor comprensión de los datos y tomar



mejores decisiones. Este software cuenta con una completa plataforma de información que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelos, mapas y globos en 3D, poniéndolos a disposición de todos los usuarios según las necesidades de la organización (ESRI España, 2010).

Los componentes básicos de este SIG son: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox. De modo que, esta herramienta cuenta con una aplicación para entrada y salida de datos, así como de búsquedas estadísticas y geográficas gracias a ArcMap. Además, tiene la capacidad de organizar y documentar los datos geográficos a través de ArcCatalog. Por último, el componente ArcToolbox permite el geoprocésamiento, es decir la combinación de capas de información, manipulación de los datos de definición y la transformación de sistemas de coordenadas, entre otras muchas funciones de conversión y análisis que resultan esenciales para el adecuado aprovechamiento de toda la información disponible (Sámano Celorio, 2011).

3.3.3 Índice de la Calidad del Agua (ICA)

El índice de calidad de agua “Water Quality Index (WQI)” fue desarrollado en 1970 por la National Sanitation Foundation (NSF) de Estados Unidos.

Para su determinación se escogieron nueve variables: Oxígeno Disuelto, Coliformes Fecales, pH, DBO5, Nitratos, Fosfatos, Desviación de la Temperatura, Turbidez y Sólidos Totales.

Para el cálculo del Índice de Calidad del Agua se usa una suma lineal ponderada de los subíndices o una función de agregación del producto ponderado. El NSF utilizó una suma lineal ponderada. El resultado de su aplicación debe ser un número entre 0 y 100, donde 0 representa una calidad de agua muy pobre, y 100 representa la calidad de agua excelente (IDEAM CIH, 2007).



Excelente	91-100
Buena	71-90
Media	51-70
Mala	26-50
Muy Mala	0-25

Figura 1. Escala de calificación de Índice de Calidad de Cuerpos de Agua (ICA)

Fuente: National Sanitation Foundation de Estados Unidos 1970

El índice de Calidad del Agua ICA es calculado a partir de la siguiente expresión:

$$WQI = \sum_{i=1}^n Q_i W_i \quad [Ecu. 1]$$

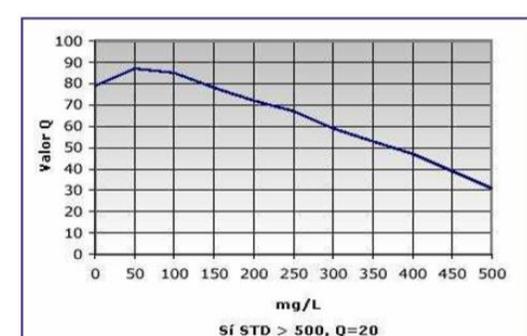
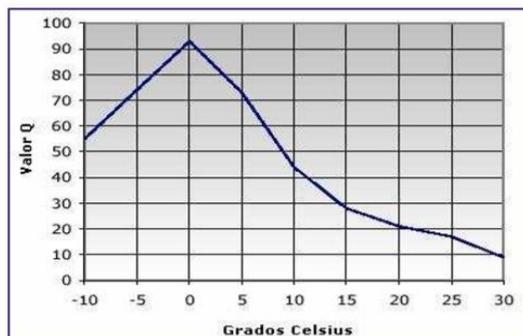
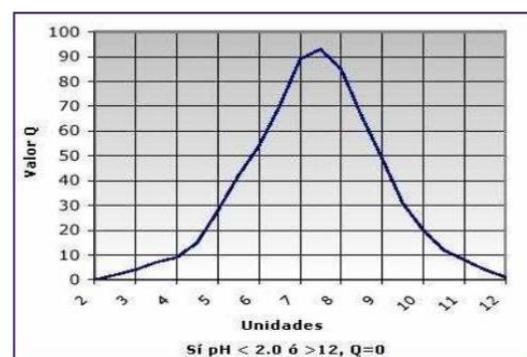
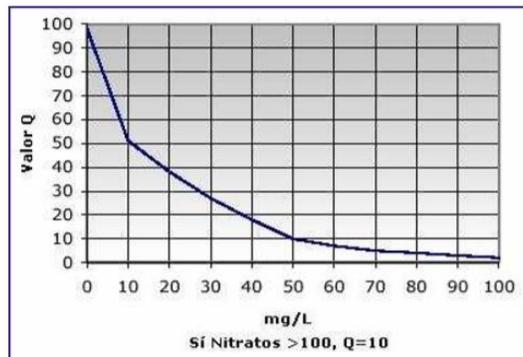
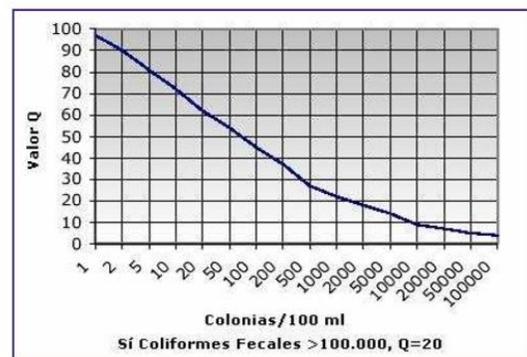
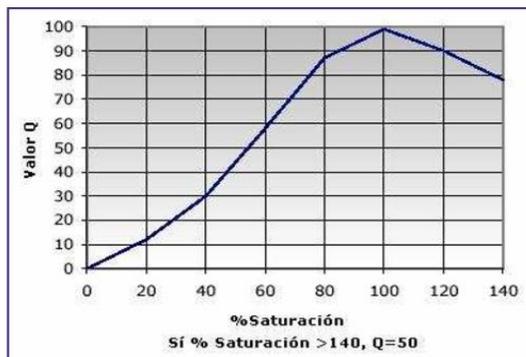
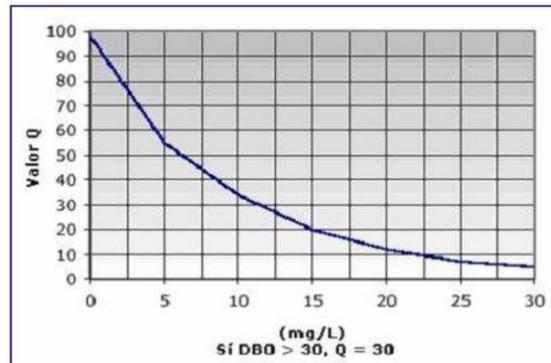
Donde:

WQI : Índice de Calidad del Agua (Adimensional)

Q_i : Calidad del i -ésimo parámetro, obtenido del respectivo gráfico de calidad, en función de la importancia de su concentración o medida.

W_i : Factor de Ponderación para el i -ésimo parámetro, atribuido en función de la importancia de ese parámetro para la conformación global de la calidad.

Se establecieron Curvas de Función para cada variable para determinar el subíndice del parámetro I , el cual se refiere al valor de calidad para cada parámetro. Los niveles de calidad del agua entre un rango de 0 a 100 fueron localizados en las ordenadas y los diferentes niveles de las variables en las abscisas. Dichas curvas fueron graficadas con un límite de confianza del 80% sobre su media aritmética y se presentan a continuación (IDEAM CIH, 2007):



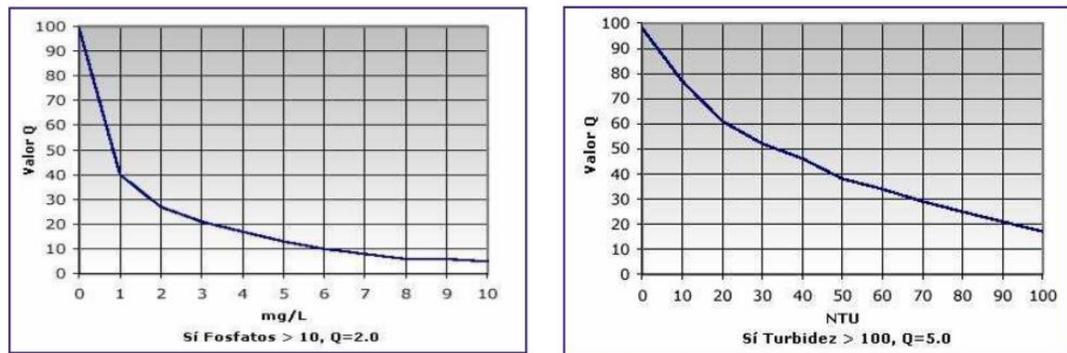


Figura 2. Funciones de Calidad NSF

Fuente: National Sanitation Foundation de Estados Unidos 1970

La suma de los pesos para los subíndices debe ser igual a uno, para lo cual se calcularon los promedios aritméticos de las variaciones para todas las variables; los pesos temporales fueron calculados dividiendo la importancia de cada parámetro sobre la valoración del peso de la variable de mayor importancia, es decir el oxígeno disuelto. Los pesos finales fueron obtenidos de la división entre los pesos temporales individuales y la suma de éstos. Dichos pesos fueron: oxígeno disuelto 0,17; Coliformes fecales 0,15; pH 0,12; DBO₅ 0,10; nitratos 0,10; fosfatos 0,10; desviación de temperatura 0,10; turbiedad 0,08; y sólidos totales 0,08 (IDEAM CIH, 2007).

3.3.4 Índice de la Calidad de Aguas Marinas y Costeras para la Preservación de Flora y Fauna (ICAMPFF)

El indicador, facilita la interpretación de la calidad del ambiente marino, la evaluación del impacto de las actividades antropogénicas y la toma de medidas de prevención y recuperación para valorar la calidad de las aguas marinas, es decir, su capacidad de soportar la vida marina y los procesos biológicos (INVEMAR, Sistema de Indicadores de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia - SISCAM, 2012).

El indicador es un número adimensional que representa la calidad del recurso hídrico marino, en forma de porcentaje (valores entre 0 y 100). Se calcula el subíndice para transformar los valores de cada variable a una escala adimensional de acuerdo a la escala de valoración



definida, aplicando la fórmula de la curva de funcionamiento (índice calculado). Cuando existan valores extremos se recomienda ajustar el subíndice por exceso o por defecto entre 1 y cien (1 - 100), siendo 1 para los valores negativos y 100 para los valores superiores a cien (INVEMAR, Ficha Técnica Indicador Regional – Calidad del Agua, 2011).

Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que intervienen en el cálculo son: Oxígeno Disuelto, Sólidos Suspendidos Totales, Nitratos, Fosfatos, Coliformes Termotolerantes, Hidrocarburos del petróleo, pH y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).

La ecuación de agregación, contempla el producto ponderado de las variables que componen el ICAM, definida como sigue:

$$ICAMPFF = \left(\prod_{i=1}^n x_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum w_i}} \quad [Ecu. 2]$$

Donde:

x_i : Subíndice de calidad de la variable i

w_i : Factor de ponderación peso para el subíndice i

El resultado de la ecuación es un número adimensional (de cero a cien) que representa la calidad del agua (óptima, adecuada, aceptable, inadecuada y pésima).

Escala de Calidad	Categorías	Descripción
Óptima	100-90	Calidad excelente del agua
Adecuada	90-70	Agua con buenas condiciones para la vida acuática
Aceptable	70-50	Agua que conserva buenas condiciones y pocas restricciones de uso
Inadecuada	50-25	Agua que presenta muchas restricciones de uso
Pésima	25-0	Aguas con muchas restricciones que no permiten un uso adecuado

Figura 3. Rango de clasificación o valoración de la calidad del agua del ICAM

Fuente: INVEMAR, 2011



3.3.5 Análisis Estadístico de los Datos

Las medidas resúmenes son útiles para comparar conjuntos de datos cuantitativos y para presentar los resultados de un estudio y se clasifican en dos grupos principales:

3.3.5.1 Medidas de Posición

Una medida de posición es un número que pretende indicar dónde se encuentra el centro de la distribución de un conjunto de datos. No hay una única medida de posición para resumir una distribución. Si la distribución es simétrica, diferentes medidas conducirán a similares resultados. Si la distribución es claramente asimétrica, diferentes propuestas apuntarán a distintos conceptos de “centro” y por lo tanto los valores serán diferentes (Orellana, 2001).

- ✓ **Media Aritmética o Promedio:** Es la medida de posición más frecuentemente usada. Para calcular la media aritmética o promedio de un conjunto de observaciones se suman todos los valores y se divide por el número total de observaciones. Si tenemos una muestra de n observaciones y denotadas por X_1, X_2, \dots, X_n , definimos la media muestral \bar{X} con la siguiente expresión:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [Ecu. 3]$$

- ✓ **Percentiles y Cuartiles:** El percentil $p\%$ de un conjunto de datos es la observación que deja a lo sumo $p\%$ de las observaciones debajo de él y a lo sumo $(1 - p) \%$ encima de él. La mediana siendo el dato que ocupa la posición central en la muestra ordenada de menor a mayor, es el percentil 50%. Otros percentiles con nombre propio son el percentil 25% y el percentil 75% que se denominan cuartil inferior y superior respectivamente, ya que juntamente con la mediana dividen a la distribución en 4 porciones iguales.



3.3.5.2 Medidas de Dispersión

Las medidas de dispersión o variabilidad describen cuán cercanos se encuentran los datos entre ellos, o cuán cerca se encuentran de alguna medida de posición.

- ✓ Rango Muestral: El rango de n observaciones X_1, X_2, \dots, X_n es la diferencia entre la observación más grande y la más pequeña, es decir:

$$\text{Rango} = \text{máx}(X_i) - \text{mín}(X_i) \quad [\text{Ecu. 4}]$$

- ✓ Desviación Estándar: La desviación estándar mide cuán lejos se encuentran los datos de la media muestral. Se calcula como la raíz cuadrada positiva de la varianza.

$$s = \sqrt{s^2} \quad [\text{Ecu. 5}]$$

- ✓ Varianza Muestral: Definimos la varianza de una muestra de observaciones X_1, X_2, \dots, X_n , cuya media es \bar{X} , como

$$s^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad [\text{Ecu. 6}]$$

Es menester mencionar que la varianza no tiene las mismas unidades que los datos.

3.3.6 Decreto 1594 de 1984

En el Decreto 1594 de 1984 derogado por el artículo 79 del Decreto Nacional 3930 de 2010, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible (1984) se reglamenta en cuanto a usos del agua y residuos líquidos, el cual no fue usado como base reglamentaria del trabajo de grado debido a que es un borrador y por lo tanto no ha sido aprobado.

El Decreto 1594 en el artículo 24, señala que para el establecimiento de modelos de simulación de calidad que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias



biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables, la Entidad Encargada del Manejo y Administración del Recurso (EMAR) deberá por lo menos realizar periódicamente un análisis relacionado con la siguiente información:

- DBO5: Demanda Bioquímica de oxígeno a cinco (5) días.
- DQO: Demanda Química de Oxígeno.
- SS: Sólidos suspendidos.
- pH: Potencial del Ion Hidronio, H⁺.
- T: Temperatura.
- OD: Oxígeno disuelto.
- Q: Caudal.
- Datos Hidrobiológicos.
- Coliformes (NMP).

En el Capítulo IV define los criterios de calidad dependiendo de la destinación del recurso hídrico como sigue. Cabe mencionar que los valores asignados a las referencias indicadas se entenderán expresados en miligramos por litro, mg/l, excepto cuando se indiquen otras unidades:

- a. Destinación del recurso para consumo humano y doméstico, que para su potabilización requiere solamente tratamiento convencional.

Referencia	Expresado como	Valor
Amoníaco	N	1.0
Arsénico	As	0.05
Bario	Ba	1.0
Cadmio	Cd	0.01
Cianuro	CN-	0.2
Cinc	Zn	15.0
Cloruros	Cl-	250.0
Cobre	Cu	1.0
Color	Color real	75 unidades, escala Platino - cobalto
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Cromo	Cr ⁺⁶	0.05



DifenilPoliclorados	Concentración de agente activo	No detectable
Mercurio	Hg	0.002
Nitratos	N	10.0
Nitritos	N	1.0
pH	Unidades	5.0 - 9.0 unidades
Plata	Ag	0.05
Plomo	Pb	0.05
Selenio	Se	0.01
Sulfatos	SO ₄	400.0
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5
Coliformes totales	NMP	20.000 microorganismos/100 ml.
Coliformes fecales	NMP	2.000 microorganismos /100 ml.

Tabla 1. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para consumo humano y doméstico, con potabilización por tratamiento convencional

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 1984)

- b. Destinación del recurso para consumo humano y doméstico, que para su potabilización requiere solo desinfección.

Referencia	Expresado como	Valor
Amoniaco	N	1.0
Arsénico	As	0.05
Bario	Ba	1.0
Cadmio	Cd	0.01
Cianuro	CN-	0.2
Cinc	Zn	15.0
Cloruros	Cl-	250.0
Cobre	Cu	1.0
Color	Color Real	20 unidades, escala Platino - cobalto
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Cromo	Cr ⁺⁶	0.05
DifenilPoliclorados	Concentración de agente activo	No detectable
Mercurio	Hg	0.002
Nitratos	N	10.0
Nitritos	N	1.0
pH	Unidades	6.5 - 8.5 unidades
Plata	Ag	0.05
Plomo	Pb	0.05
Selenio	Se	0.01
Sulfatos	SO ₄	400.0



Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5
Turbiedad	UJT	10 Unidades Jackson de Turbiedad, UJT
Conformes totales	NMP	1.000 microorganismos/100 ml.

Tabla 2. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para consumo humano y doméstico, con potabilización por desinfección

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 1984)

c. Destinación del recurso para uso agrícola.

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.1
Berilio	Be	0.1
Cadmio	Cd	0.01
Cinc	Zn	2.0
Cobalto	Co	0.05
Cobre	Cu	0.2
Cromo	Cr ⁺⁶	0.1
Flúor	F	1.0
Hierro	Fe	5.0
Litio	Li	2.5
Manganeso	Mn	0.2
Molibdeno	Mo	0.01
Níquel	Ni	0.2
pH	Unidades	4.5 - 9.0 unds.
Plomo	Pb	5.0
Selenio	Se	0.02
Vanadio	V	0.1

Tabla 3. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso agrícola

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 1984)

d. Destinación del recurso para uso pecuario.

Referencia	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	5.0
Arsénico	As	0.2
Boro	B	5.0
Cadmio	Cd	0.05
Cinc	Zn	25.0



Cobre	Cu	0.5
Cromo	Cr+ ⁶	1.0
Mercurio	Hg	0.01
Nitratos + Nitritos	N	100.0
Nitrito	N	10.0
Plomo	Pb	0.1
Contenido de sales	Peso total	3.000

Tabla 4. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso pecuario

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 1984)

e. Destinación del recurso para uso recreativo mediante contacto primario.

Referencia	Expresado como	Valor
Coliformes fecales	NMP	200 microorganismos/100 ml.
Coliformes totales	NMP	1.000 microorganismos/100 ml.
Compuestos Fenólicos	Fenol	0.002
Oxígeno disuelto	OD	70% concentración de saturación
pH	Unidades	5.0 - 9.0 unidades
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5

Tabla 5. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso recreativo mediante contacto primario

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 1984)

f. Destinación del recurso para uso recreativo mediante contacto secundario.

Referencia	Expresado como	Valor
Coliformes totales	NMP	5.000 microorganismos/100 ml.
Oxígeno disuelto	OD	70% concentración de saturación
pH	Unidades	5.0 - 9.0 unidades
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.5

Tabla 6. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para uso recreativo mediante contacto secundario

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 1984)

NOTA: No se aceptará en el recurso película visible de grasas y aceites flotantes, presencia de material flotante proveniente de actividad humana; sustancias tóxicas o irritantes cuya



acción por contacto, ingestión o inhalación, produzcan reacciones adversas sobre la salud humana. Además, el nitrógeno y el fósforo deberán estar en proporción que no ocasionen eutrofización. Lo anterior aplica para uso recreativo mediante contacto primario y secundario.

g. Destinación del recurso para preservación de flora y fauna.

REFERENCIA	EXPRESADO COMO	Agua fría dulce	VALOR Agua cálida dulce	Agua marina y estuarina
Clorofenoles	Clorofenol	0.5	0.5	0.5
Difenil'	Concentración de agente activo	0.0001	0.0001	0.0001
Oxígeno disuelto	-	5.0	4.0	4.0
pH	Unidades de pH	5.5-9.0	4.5-9.0	6.5-8.5
Sulfuro de hidrogeno ionizado	H ₂ S	0.0002	0.0002	0.0002
Amoniaco	NH ₃	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Arsénico	As	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Bario	Ba	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Berilio	Be	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Cadmio	Cd	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Cianuro libre	CN-	0.05 CL	0.05 CL	0.05 CL
Cinc	Zn	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Cloro total residual	Cl ₂	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Cobre	Cu	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Fenoles mono-hídricos	Fenoles	1.0 CL	1.0 CL	1.0 CL
Grasas y aceites	Grasas como porcentaje de sólidos secos	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Hierro	Fe	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Manganeso	Mn	0.1 CL	0.1 CL	0.1 CL
Mercurio	Hg	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL



Níquel	Ni	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Plaguicidas Organoclorados (cada variedad)	Concentración de agente activo	0.001 CL	0.001 CL	0.001 CL
Plaguicidas organofosforados (cada variedad)	Concentración de agente activo	0.05 CL	0.05 CL	0.05 CL
Plata	Ag	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Plomo	Pb	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Selenio	Se	0.01 CL	0.01 CL	0.01 CL
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	0.143 CL	0.143 CL	0.143 CL

Tabla 7. Criterios de calidad con destinación del recurso hídrico para preservación de flora y fauna

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 1984)

- h. Destinación del recurso para uso estético son los siguientes: 1) Ausencia de material flotante y de espumas, provenientes de actividad humana. 2) Ausencia de grasas y aceites que formen película visible. 3) Ausencia de sustancias que produzcan olor.
- i. Para los usos referentes a transporte, dilución y asimilación no se establecen criterios de calidad, sin perjuicio del control de vertimientos correspondiente.
- j. Para el uso industrial, no se establecen criterios de calidad, con excepción de las actividades relacionadas con explotación de cauces, playas y lechos, para las cuales se deberán tener en el parágrafo 1 del artículo 42 y en el artículo 43.



4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar la variación de la calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen de la ciudad de Cartagena de Indias mediante el cálculo de índices de calidad, luego de la construcción y entrada en operación del Emisario Submarino en Enero del año 2013, a través de la comparación de parámetros físicos, químicos y microbiológicos actuales, con los que se han tomado históricamente, y así verificar que se han cumplido a cabalidad los objetivos trazados al inicio del proyecto Emisario Submarino.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analizar la variación de la calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen a partir de índices de calidad, desde 1999 (año anterior a la construcción de la Bocana Estabilizada de Mareas) hasta Mayo de 2014, mediante el estudio de parámetros físico-químicos y microbiológicos tomados en 16 puntos estratégicos del estuario. Además de la comparación entre los valores obtenidos desde el inicio de operación del Emisario Submarino, y los establecidos como ideales según las metas fijadas al inicio del proyecto en mención.
- ✓ Verificar el uso que le puedan dar los habitantes y turistas de la ciudad a la Ciénaga de la Virgen y el que le han dado desde 1999, con base en lo reglamentado por las normas colombianas relacionadas con la calidad del agua, en el Decreto 1594 de 1984.
- ✓ Realizar un análisis tendencial de la calidad del agua de la Ciénaga luego de la entrada en operación del Emisario Submarino, utilizando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (SIG).



5. METODOLOGÍA

El presente trabajo investigativo tuvo como objeto analizar la variación de la calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen, luego de la construcción y operación del Emisario Submarino, la cual se encuentra ubicada en la zona norte de la ciudad de Cartagena de Indias, en las coordenadas 10° 26' 45'' Latitud Norte y 75° 29' 40'' Latitud Oeste. El estuario comprende una superficie de 2989 Ha, con una profundidad máxima de 1.5 m y una longitud de 7 km; la cuenca tiene un área total de 520 km² y está rodeada por la red de drenaje principal de la ciudad de Cartagena, conformado por ocho arroyos en la zona rural y veinte canales en el perímetro urbano (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Alcaldía de Cartagena de Indias, Establecimiento Público Ambiental - EPA Cartagena, Observatorio del Caribe Colombiano, 2009).

El estudio se realizó entre los meses de Julio y Septiembre del año 2014; pero se analizó la información encontrada desde Enero de 1999 hasta Mayo de 2014. Este proyecto estuvo enmarcado en un tipo de investigación documental - descriptiva. El primer tipo se debe a que no se tomó información primaria, ni se realizó ningún tipo de experimentos y por ende no hubo manipulación o control de variables; los datos analizados fueron medidos por entidades públicas como el EPA y ACUACAR. Por otra parte, la investigación es de tipo descriptivo en la medida en que se caracterizó el estuario a partir de procesos sobre calidad de agua.

A continuación se resume la metodología en la Figura 4, enfocada a los objetivos planteados en el proyecto.

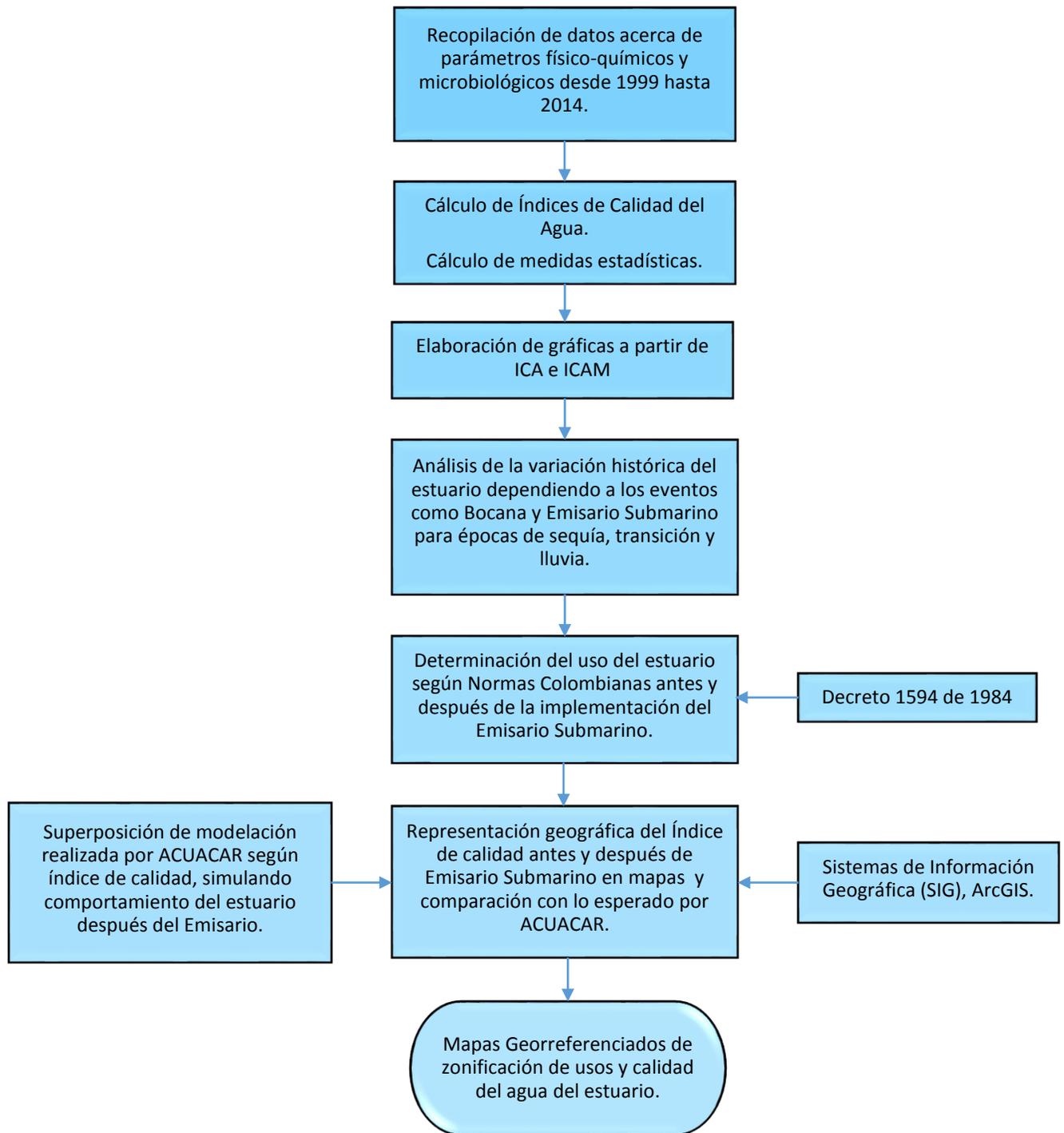


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso realizado en el proyecto de investigación

Fuente: Autores



El anterior diagrama de flujo muestra en resumen el proceso ejecutado para alcanzar los objetivos propuestos en el trabajo de grado. Se realizó la evaluación de los parámetros en diferentes puntos a lo largo de la Ciénaga, teniendo en cuenta la relación existente entre ellos; se determinó el uso del estuario por parte de los habitantes y turistas de la ciudad de Cartagena, y luego se realizó la zonificación del estuario teniendo en cuenta la calidad del agua, a partir de un análisis tendencial que permitió contrastar las incidencias de los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos en dicha calidad, con ayuda de la herramienta de Sistema de Información Geográfica, ArcGIS.

La metodología de trabajo establecida en este proyecto está descrita detalladamente en las siguientes etapas:

5.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN HISTÓRICA DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN

En esta primera etapa de la metodología, se recolectó toda la información necesaria para desarrollar el proyecto. En primera instancia se recaudó información secundaria referente a estudios previos realizados por instituciones del país interesadas en analizar los cambios sufridos en el estuario de la Ciénaga, considerando que es un cuerpo de agua crítico debido a que ha sido el lugar de disposición de las aguas residuales de la ciudad de Cartagena desde el inicio de su sistema de alcantarillado.

La información recopilada fue suministrada por las entidades públicas EPA y ACUACAR. El EPA ha realizado monitoreos periódicamente desde 1999 hasta la actualidad a una serie de 15 puntos ubicados a lo largo de la Ciénaga y en sus alrededores, de los cuales para este estudio se seleccionaron nueve (9) debido a que se desconocían las coordenadas de los restantes. Por su parte, ACUACAR también ha realizado monitoreos a siete (7) puntos ubicados dentro del estuario, pero sólo luego de la implementación del Emisario Submarino, es decir, desde 2013. De estos si se escogieron todos, por lo que se trabajó con un total de 16 puntos localizados como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Ubicación geográfica de los puntos estudiados a lo largo del estuario

Fuente: Modificado por Autores en Google Earth 2015



Las coordenadas geográficas de los puntos estudiados ilustrados en la figura 5 son detallados en la tabla 8:

Punto	Fuente	Código	Latitud (N)	Longitud (W)
E0	ACUACAR	8	10°25'52"N	75°30'32.2"O
E1	ACUACAR	9	10°25'5"N	75°29'31.3"O
E2	ACUACAR	10	10°27'28.3"N	75°30'14.2"O
E3	ACUACAR	11	10°27'21.3"N	75°29'30"O
E4	ACUACAR	12	10°28'27.4"N	75°29'28.5"O
E5	ACUACAR	13	10°29'13.4"N	75°29'22.7"O
E6	ACUACAR	14	10°29'54.5"N	75°29'27.7"O
P2	EPA	2	10°25'32.1"N	75°30'49.1"O
P4	EPA	4	10°25'18"N	75°30'21.6"O
P5	EPA	5	10°25'26"N	75°29'29.8"O
P6	EPA	6	10°25'11.5"N	75°29'20.2"O
P7	EPA	7	10°25'50.2"N	75°29'15.9"O
P8	EPA	8	10°26'1.20"N	75°29'32.24"O
P10	EPA	10	10°28'17.5"N	75°29'16.4"O
P22	EPA	22	10°29'19.07"N	75°28'52.47"O
P28	EPA	28	10°29'1.5"N	75°29'8.6"O

	Zona Norte
	Zona Sur

Tabla 8. Coordenadas geográficas de los puntos estudiados

Fuente: (ACUACAR, 2002) & (Establecimiento Público Ambiental (EPA))

Para un mejor estudio de los datos obtenidos, la Ciénaga fue dividida en dos partes: Zona Norte y Zona Sur. A la primera le corresponden los puntos E2, E3, E4, E5, E6, P10, P22, P28; y a la segunda E0, E1, P2, P4, P5, P6, P7, P8. Esto debido a que se consideró la Zona Sur especialmente afectada, por recibir directamente los vertimientos de aguas residuales del alcantarillado de la ciudad, además de los arroyos existentes en la zona rural y los vertimientos informales que aún se presentan.

Lo anterior se hizo básicamente dividiendo el estuario según el flujo de agua que entra y sale de la Ciénaga en intercambio con el Mar Caribe. Además, el período de tiempo estudiado también se discriminó en tres partes: Antes de la construcción de la Bocana (1999-2000), entre la Bocana y el Emisario Submarino (2001-2012) y luego de la construcción del Emisario (2013-2014).



Es importante mencionar que la información histórica recopilada se encuentra incompleta, puesto que ya sea el EPA (íconos verdes en Figura 5) o ACUACAR (íconos amarillos), no realizaron todos los monitoreos en su momento por algún motivo en particular, ya sea económico, atmosférico o de otra índole, por lo que no se tiene un 100% de veracidad en los resultados obtenidos (Ver Anexo 2: Información por Puntos “Info Ordenada”).

Como información adicional, la entidad ACUACAR proporcionó la modelación matemática que simuló el comportamiento del cuerpo de agua a partir de la implementación del Emisario Submarino con un pequeño porcentaje de vertimientos informales de aguas residuales, realizada por la compañía Haskoning Nederland BV Coastal and Rivers de Royal Haskoning utilizando el software Mike21 en el año 2003.

Para indicar la variación histórica de la calidad del agua del estuario se realizó como segunda actividad el cálculo de dos índices de Calidad del Agua debido a que entre sus ventajas se encuentran la facilidad para interpretar los resultados, permiten identificar tendencias de la calidad y áreas problemáticas dentro de un cuerpo de agua e integran parámetros tanto físico-químicos como microbiológicos aunque de una manera muy resumida y su conceptualización es muy general donde al tomar datos en un instante determinado no se logra una integración temporal de los mismos (Reolon, 2010). El primero es el Índice de Calidad del Agua (ICA) desarrollado en 1970 por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) de Estados Unidos. Para su cálculo se utilizaron las siguientes variables: Oxígeno Disuelto, Coliformes Fecales, pH, DBO5, Nitratos, Fosfatos, Desviación de Temperatura, Turbiedad y Sólidos Totales. El resultado obtenido comprende valores entre 0 y 100, donde 100 representa la calidad del agua excelente.

Caber resaltar, que los valores de las variables fueron el resultado de promediar los datos para los meses encontrados en cada una de las épocas de sequía, transición y de lluvia, ya que así fue como se agruparon.

Ahora bien, debido a la escases de datos, se encontró que en ninguno de los años se registraron valores de turbiedad, por lo tanto, ya la suma ponderada máxima vendría siendo



de 0.92, no de 1. Es decir, los valores de ponderación no fueron cambiados dependiendo al número de parámetros en el cálculo de ICA, en lugar de ello la fórmula fue modificada por la siguiente expresión:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad [Ecu. 7]$$

El segundo índice empleado es el Índice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras (ICAM) desarrollado por INVEMAR. Para su cálculo se emplearon parámetros como Oxígeno Disuelto, Nitratos, Sólidos Suspendidos Totales, Coliformes Termotolerantes, pH, Hidrocarburos disueltos y dispersos, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Fosfatos. Este indicador es un número adimensional que representa la calidad de aguas marinas y estuarinas en forma de porcentaje (valores entre 0 y 100).

Así se logró como producto, tablas de índices de calidad del agua para cada punto estudiado y por épocas en cada año. Cabe mencionar que no siempre el cálculo de los mismos se realizó con todos los parámetros empleados por falta de información, por lo que se redefinió su expresión. Es importante mencionar que luego del cálculo de dichos índices se escogió uno de los dos para continuar con el proceso.

Luego, se realizó un análisis estadístico de los datos estudiados, donde se aplicaron medidas de posición como la media aritmética o promedio y percentiles; y medidas de dispersión como rango muestral, desviación estándar y varianza muestral. Todos estos cálculos se realizaron para cada año en cada una de las épocas consideradas.

Por último, la información obtenida para cada una de las épocas estudiadas desde 1999 hasta la actualidad, se resumieron en gráficas XY (dispersión), de área, y diagramas circulares, teniendo en cuenta valores máximos, mínimos y promedios, además de algunos balances hídricos encontrados y las intervenciones de ingeniería implementadas, como lo son la construcción de la Bocana Estabilizada de Mareas, la eliminación de los vertimientos directos sin tratamiento para disponer el efluente del sistema de alcantarillado de la ciudad, y la



implementación del Emisario Submarino. Obteniendo así, la variación de los parámetros estudiados y de índices de calidad con el transcurrir del tiempo.

5.2 DETERMINACIÓN DEL USO DEL CUERPO DE AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN A PARTIR DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Se verificaron los resultados obtenidos durante el período de 1999 hasta Mayo 2014 con lo establecido por el Decreto 1594 de 1984 de las Normas Colombianas y con los estándares fijados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), para así determinar el uso que tiene el estuario dependiendo al cumplimiento de los parámetros físico-químicos y microbiológicos.

Se realizó como primera actividad la comparación del parámetro principal indicador de contaminación fecal en cuanto a parámetros microbiológicos, el cual es la determinación de coliformes termotolerantes (antiguamente denominados como fecales) y Escherichia Coli. Esto se realizó para cada uno de los puntos suministrados por EPA y ACUACAR. No se discriminó el uso que esta puede tener para cada una de las tres épocas de sequía, transición y de lluvia, debido a que se pretende dar confiabilidad de que esta misma pueda ser apta para determinada actividad sin restricciones de tiempo.

Posteriormente, se verificaron otros parámetros como pH, Nitrato, porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto, entre otros y así se zonificó el estuario de acuerdo al uso recreativo con actividades de contacto primario o secundario.

5.3 ANÁLISIS TENDENCIAL A PARTIR DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

En esta etapa se elaboró un análisis tendencial, es decir, se observó el comportamiento de los índices de calidad obtenidos durante el período de tiempo estudiado, que permitió resumir la información ubicada geográficamente por coordenadas, con una representación lógica y visualmente eficiente a partir de la compilación de datos espaciales que pudieron ser



localizados en un mapa o georreferenciados. Esto con el fin de suponer posibles cambios en la categoría de la calidad del agua de la Ciénaga en un futuro.

Como primera actividad, se realizó un mapa con base en el índice de calidad del agua, antes y después de la construcción e implementación del Emisario Submarino para cada una de las épocas de sequía, transición y de lluvia. Esto se logró utilizando el promedio de los años entre 1999 y 2012, anteriores al Emisario Submarino y posterior a este se tuvieron en cuenta por separado la evolución de los resultados para el 2013 y 2014. A su vez, se representó la zonificación del estuario de acuerdo a los usos que este puede tener por sus características físicas, químicas y microbiológicas, luego de la implementación del Emisario Submarino.

Por último, se elaboró la superposición de la modelación suministrada por ACUACAR, es decir, se apilaron o combinaron cada una de las capas (mapas con la simulación para cada uno de los parámetros evaluados teniendo en cuenta el índice de calidad para un cuerpo de agua estuarino) en una nueva que contendría las características y atributos de todas ellas. Lo anterior se realizó con el fin de comparar los resultados obtenidos tras la implementación del Emisario Submarino con lo esperado por ACUACAR.

Para la realización de los mapas anteriormente mencionados, se empleó un Sistema de Información Geográfica (SIG) que para el caso fue el software ArcGIS. En primera instancia, se realizó a partir de esta herramienta un análisis exploratorio a través del mapeo de los datos, usando un esquema de clasificación y paleta de colores que permitieron visualizar la distribución espacial de las variables consideradas, para así dar claridad a la mejora total o sectorial de la Ciénaga de la Virgen. Las funciones de análisis estadístico en ArcGIS Desktop que se emplearon fueron ArcMap y ArcCatalog. La primera para dibujo, digitalización y modificación de los datos (Ver Figura 6), y la segunda para la creación de las capas y propiedades.

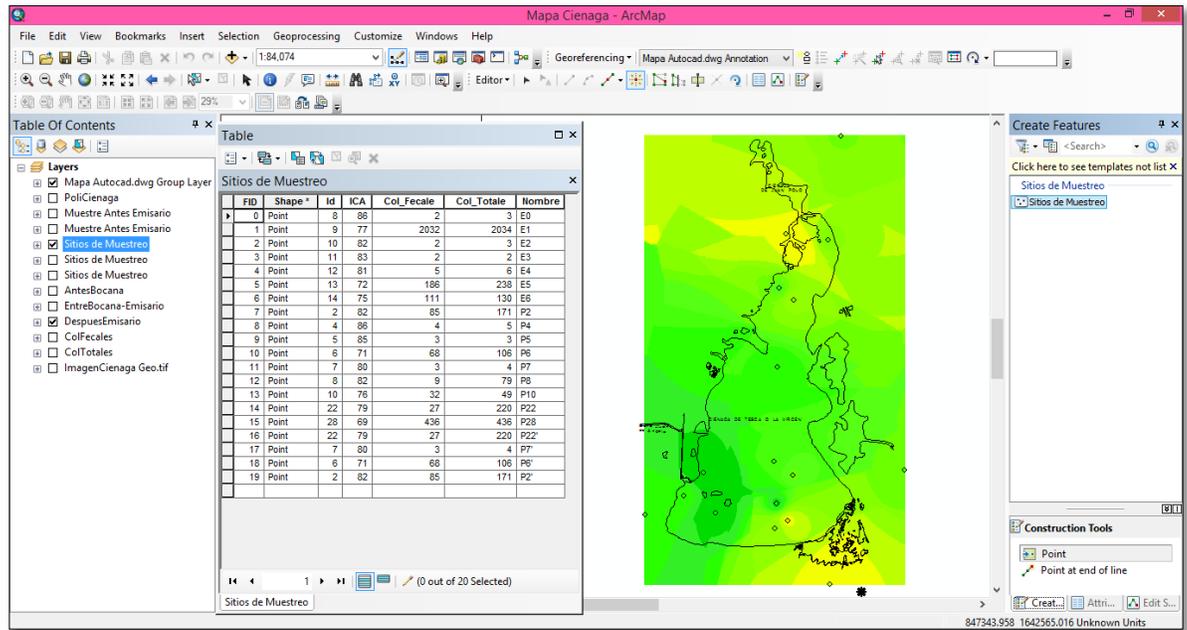


Figura 6. Visualización del manejo del software ArcGIS.

Fuente: Autores



6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Ciénaga de la Virgen es un estuario ubicado en la zona norte de la ciudad de Cartagena de Indias, en las coordenadas 10° 26' 45'' Latitud Norte y 75° 29' 40'' Latitud Oeste. Comprende una superficie de 2989 Ha, con una profundidad máxima de 1.5 m y una longitud de 7 km; la cuenca tiene un área total de 520 km² y está rodeada por la red de drenaje principal de la ciudad de Cartagena, conformado por ocho arroyos en la zona rural y veinte canales en el perímetro urbano.

La presente investigación estuvo basada en la recopilación de artículos y documentos relacionados con el estudio de la Ciénaga de la Virgen, además de una serie de datos de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos medidos por entidades públicas como el EPA y ACUACAR. Esto con el fin de caracterizar el estuario a partir de índices de calidad del agua y a su vez determinar el uso que podía tener la misma por parte de la comunidad, teniendo en cuenta que ha sido intervenida tanto por la construcción de estructuras hidráulicas como la Bocana Estabilizada de Mareas y el Emisario Submarino, como por la eliminación de los vertimientos de agua residual.

Los resultados obtenidos del estudio están divididos en tres etapas, correspondientes al análisis de la variación histórica de la calidad del agua de la Ciénaga, determinación del uso de la misma y una representación gráfica de la zonificación del estuario teniendo en cuenta su uso, a partir de un análisis tendencial empleando un SIG. A continuación se detallan cada una de estas etapas.

6.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN HISTÓRICA DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN

Es necesario mencionar que de acuerdo con la Figura 5 (Ubicación geográfica de los puntos estudiados a lo largo del estuario), los puntos se encuentran ubicados aguas arriba, aguas abajo de los vertimientos y cerca de los puntos de descarga, tal como lo establece el IDEAM en sus lineamientos para fuentes hídricas receptoras y teniendo como objetivo del monitoreo, determinar la capacidad de autodepuración de dicha fuente (Fajardo, 2010). Así mismo, la



mayoría de los puntos se ubicaron en las zonas periféricas al estuario, las cuales resultan ser las más afectadas por las descargas de agua residual y por los desagües y canales que recogen el agua de lluvia de la ciudad de Cartagena. Ahora bien, aunque dichas zonas sean las de mayor cuidado, sería conveniente realizar monitoreos en las zonas internas de la Ciénaga, es decir entre la Zona Norte y Sur, para corroborar que tengan una calidad adecuada.

6.1.1 Cálculo de Índices de Calidad del Agua: ICA e ICAMPFF

El cálculo de los índices de calidad: ICA e ICAMPFF desde 1999 hasta 2014 se muestran en el Anexo 2: ICA, y se resumen a continuación en las Figuras 6 y 7.

Inicio Operación Bocana Est. de Mareas

Índice	Fuente	Punto	1999			2000			2001			2002			2003		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Índice de Calidad de Agua (ICA)	ACUACAR	E0															
	ACUACAR	E1															
	ACUACAR	E2															
	ACUACAR	E3															
	ACUACAR	E4															
	ACUACAR	E5															
	ACUACAR	E6															
	EPA	P2	53		47	60	60	49	64	70	68	53	63	71	60	78	84
	EPA	P4	59		56	59	65	63	71	72	73	65	74	71	64	80	89
	EPA	P5	65		51	61	63	57	71	78	75	77	61	76	77	80	90
	EPA	P6	52		48	57	54	57	64	68	62	57	52	59	66	78	89
	EPA	P7	62		65	66	67	57	71	74	73	75	47	62	80	81	82
	EPA	P8	66		65	68	70	56	74	75	75	73	75	73	84	79	85
	EPA	P10	72		66	73	76	57	76	76	80	75	82	81	82	82	80
EPA	P22				71			80	78	83	79	74	78	74	78	85	
EPA	P28							67	77	66	72	59	51	57	81	71	
Índice de Calidad de Agua (ICA)	ACUACAR	E0															
	ACUACAR	E1															
	ACUACAR	E2															
	ACUACAR	E3															
	ACUACAR	E4															
	ACUACAR	E5															
	ACUACAR	E6															
	EPA	P2	59	60	81	39	55	51	40	42	44	41	50	46	51	55	53
	EPA	P4	71	64	82	55	68	52	48	47	49	64	58	65	71	59	74
	EPA	P5	75	69	80	62	52	54	50	48	41	61	62	67	62	65	66
	EPA	P6	52	65	77	59	56	62	39	45	43	55	58	54	49	57	69
	EPA	P7	64	63	71	55	54	56	49	52	37	53	56	65	57	60	68
	EPA	P8	73	68	68	74	52	54	74	69	45	75	62	62	76	58	83
	EPA	P10	71	72	82	77	58	66	79	70	63	77	72	74	74	67	78
EPA	P22	74	56	63	67	62	62	68	68	55	70	76	69	69	58	78	
EPA	P28	73	59	69	68	60	59	66	50	57	69	63	66	63	58	71	



Inicio Operación | Emisario Submarino

Índice	Fuente	Punto	2009			2010			2011			2012			2013			2014	
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Índice de Calidad de Agua (ICA)	ACUACAR	E0													72	71		85	87
	ACUACAR	E1													67	67		72	82
	ACUACAR	E2													71	73		81	84
	ACUACAR	E3													71	74		82	84
	ACUACAR	E4													69	73		80	81
	ACUACAR	E5													71	61		74	71
	ACUACAR	E6													74	68		78	73
	EPA	P2	61		51	56	73	62	54	63	62	58	63	56	71	77	76	79	86
	EPA	P4	80		65	57	76	59	55	54	59	64	62	60	77	80	80	86	86
	EPA	P5	76						64	45	56	53	55	62	79	72	80	86	84
	EPA	P6	62		55	61	66	59	61	61	52	39	62	58	69	69	72	74	69
	EPA	P7	55		57	58	63	60	57	54	60	61	63	60	72	79	76	80	81
	EPA	P8	83						79	43	65	49	35	67	75	82	77	83	81
	EPA	P10	80		68	70	71	65	64	77	63	57	66	73	66	74	79	74	78
	EPA	P22	52		71				77	47	63	63	39	73	80	81	81	79	80
EPA	P28	70		62	60	59	55	68	66	57	73	76	72	71	63	62	68	69	

Figura 7. Índice de Calidad de Agua - ICA

Fuente: Autores

A partir del cálculo del ICA (Figura 7), se pudo observar que para el periodo entre 1999 y 2000 correspondientes a antes de la Bocana, cuando se realizaban los procesos de construcción, en promedio se presentó una calidad Media que varía entre 46.8 y 75.6. Teniendo en cuenta que puntos como P2 y P6 presentan Malas condiciones debido principalmente por afectación de descargas directas de aguas residuales de las redes 7 de Agosto y colectores de barrios como Ternera y Blas de Lezo. Luego, con la implementación de la Bocana, comienza a notarse una mejoría en la calidad del agua desde el primer periodo del 2001, donde en promedio se tuvo una calidad Media a lo largo de la Ciénaga, discriminando que en la zona Norte se presentaron iguales porcentajes de Media y Buena y tan sólo un 3% de los datos fueron Malos; y en caso contrario para la zona Sur con un 13%. Cabe resaltar que a pesar de la eliminación de los puntos de vertimientos directos de aguas residuales a lo largo del sur de la Ciénaga durante 2001 a 2010 para un total de 14, éstas fueron concentradas en un solo punto de vertimiento conocido como Impulsión Paraíso, la cual se eliminó en el momento que comenzó a funcionar el Emisario Submarino. Es por esto, que se presentaron condiciones desfavorables de Mala calidad en la zona Sur del estuario principalmente durante todo el año 2006, sobre todo por valores de coliformes fecales en promedio superiores a 300.000 NMP/100ml presentado en P2 en el periodo de sequía.



Al implementarse formalmente el Emisario Submarino para Enero de 2013, comienza a notarse un cambio significativo en la Ciénaga donde en promedio, tanto los puntos críticos como los más estables presentan condiciones de Buena calidad y los de Media no son inferiores a 60, con excepción del P6 y P28 que para el 2014 todavía presentan condiciones de Media.

Ahora bien, al analizar los parámetros estudiados se puede notar que en gran medida el valor que toma finalmente ICA se ve influenciado por el valor del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, donde valores inferiores al 40% y superiores a 140% (1.6 mg/l y 5.6 mg/l) presentan malas condiciones. Además, los coliformes termotolerantes o fecales tienen incidencia cuando son inferiores a 500 NMP/100 ml ya que después de este límite no hay distinción porque la categoría es muy mala.

Con referencia a la relación entre la DBO y el OD, se puede analizar que para antes de la implementación de la Bocana se presentaban valores de oxígeno disuelto inferiores de 4 mg/l para la época de sequía en la zona Sur, pero alrededor de 10 mg/l en la época de lluvia; con respecto a la DBO, los valores eran superiores a 12 mg/l sobre todo en puntos críticos en esta zona como P2, P4, P5, P6; resaltando P2 y P6 que a su vez tienen influencia por las descargas del caño Juan Angola y vertimientos de agua residual directos provenientes de la ciudad. Luego con la implementación de la Bocana, los valores de oxígeno tendieron a mejorar oscilando entre 7 y 8 mg/l; pero en el año 2008, donde se comienzan a concentrar las descargas de agua residual en la Ciénaga, tienen una decadencia sobre todo en época de sequía donde a partir del balance hídrico se tiene mayor aporte de agua residual que de agua de escorrentía, lo cual genera valores inferiores a 5 mg/l de oxígeno disuelto. A su vez, por ejemplo en el año 2007 los valores de DBO son altos en el punto P2 hasta 29 mg/l, debido a la alta concentración de materia orgánica que ingresaba por los caños en el periodo de lluvia y esta misma se concentraba en la siguiente sequía gracias al descenso de caudal, obteniendo para este periodo un valor de 36 mg/l. Con la puesta en marcha del Emisario Submarino, puntos críticos en la zona Sur presentan una gran mejora, aunque P6 todavía para el año 2014 muestra valores de DBO superiores a 7 mg/l y los demás puntos no superan los 3 mg/l.



Por otra parte, al comparar puntos en los que la calidad fue Muy Mala con respecto a otros donde fue Buena, se observó que los datos no se correlacionan linealmente ni guardan proporciones de superioridad o inferioridad dependiendo a la categoría. Es decir, que la categoría se define dependiendo si los parámetros se encuentran o no dentro de los rangos de buena calidad, y no por ejemplo, si hay la cantidad de oxígeno disuelto disponible para descomponer la totalidad de materia orgánica.

Otro parámetro importante que debe ser analizado a pesar de que no se incluye en el cálculo del índice de calidad, es el nitrógeno amoniacal, el cual según el decreto 1594 de 1984 debe ser inferior a 1 mg/l para aguas con destinación a consumo humano. Con base en lo anterior, cabe mencionar que a pesar de que el promedio se mantuvo por debajo del límite, para puntos como P2 y P6 hasta el 2012 continuaban presentando valores hasta de 3.8 mg/l. Antes de la implementación de la Bocana los rangos oscilaron entre 0.08 y 7.52 mg/l. Con respecto al nitrato, a medida que aumentó el ICA al pasar los años este disminuyó considerablemente; antes de la Bocana el promedio era de 1.58 mg/l y después del Emisario el promedio es de 0.037 mg/l (no se tienen registros entre el periodo 2001 – 2012: entre Bocana y Emisario).

Continuando con el cálculo del segundo índice, el cual es el ICAMPFF, se utilizó una herramienta proporcionada por la entidad INVEMAR que consistió en una hoja de cálculo programada, para determinar el índice de calidad de agua para preservación de flora y fauna en un aguas marinas y costeras (Ver Anexos 2: ICAMPFF). Los resultados se muestran en la Figura 8.



VARIACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN
 PRODUCTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL EMISARIO SUBMARINO



Inicio Operación Bocana Est. de Mareas

Indice	Fuente	Punto	1999			2000			2001			2002			2003		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Indice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras para preservación de flora y fauna - ICAMPFF	ACUACAR	E0															
	ACUACAR	E1															
	ACUACAR	E2															
	ACUACAR	E3															
	ACUACAR	E4															
	ACUACAR	E5															
	ACUACAR	E6															
	EPA	P2	66		94	95	87	99	87	84	92	81	80	70	62	80	59
	EPA	P4	93		92	86	97	88	39	66	53	16	96	97	62	47	63
	EPA	P5	94		89	93	93	97	39	41	56	94	83	76	60	78	61
	EPA	P6	74		79	95	86	96	85	46	81	93	72	94	87	82	45
	EPA	P7	89		89	96	97	90	88	21	59	90	64	96	82	69	51
	EPA	P8	89		83	81	94	88	38	75	17	62	78	93	88	70	59
	EPA	P10	88		86	91	39	90	54	92	87	89	88	71	75	32	52
	EPA	P22				55			53	53	68	52	78	97	67	74	57
EPA	P28							72	89	67	37	77	73	66	81	46	

Indice	Fuente	Punto	2004			2005			2006			2007			2008		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Indice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras para preservación de flora y fauna - ICAMPFF	ACUACAR	E0															
	ACUACAR	E1															
	ACUACAR	E2															
	ACUACAR	E3															
	ACUACAR	E4															
	ACUACAR	E5															
	ACUACAR	E6															
	EPA	P2	78	85	77	100	100	98	83	77	85	63	83	78	45	70	74
	EPA	P4	63	77	94	100	80	94	43	88	88	87	91	89	48	76	86
	EPA	P5	53	86	76	96	100	94	62	89	92	89	61	89	81	82	85
	EPA	P6	76	86	75	97	100	97	89	89	88	83	89	82	48	76	84
	EPA	P7	88	84	73	97	100	94	89	89	90	90	91	87	71	78	85
	EPA	P8	88	85	69	96	100	95	75	90	92	87	92	91	70	78	87
	EPA	P10	85	81	82	93	68	94	62	90	87	88	91	86	77	73	78
	EPA	P22	87	28	53	79	60	85	64	91	89	84	89	66	51	77	84
EPA	P28	83	85	80	97	100	57	60	91	67	57	92	41	67	74	78	

Inicio Operación Emisario Submarino

Indice	Fuente	Punto	2009			2010			2011			2012			2013			2014	
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Indice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras para preservación de flora y fauna - ICAMPFF	ACUACAR	E0													73	83		49	66
	ACUACAR	E1													52	92		82	61
	ACUACAR	E2													59	94		80	72
	ACUACAR	E3													90	86		76	73
	ACUACAR	E4													61	86		81	62
	ACUACAR	E5													52	68		66	75
	ACUACAR	E6													69	86		65	78
	EPA	P2	96		88	59	73	72	79	89	91	82	86	89	80	48	81	71	70
	EPA	P4	60		94	43	72	72	80	87	91	76	92	92	67	55	88	60	81
	EPA	P5	84						84	88	89	84	84	92	81	87	89	84	74
	EPA	P6	56		90	95	57	49	80	89	79	71	77	83	70	69	81	87	74
	EPA	P7	74		87	94	74	69	79	87	89	78	84	89	73	44	89	92	66
	EPA	P8	79						89	89	90	80	68	62	89	45	90	76	90
	EPA	P10	62		90	88	72	74	83	90	86	79	83	83	75	84	89	88	90
	EPA	P22	63		71				56	88	92	78	75	84	74	88	92	40	89
EPA	P28	65		49	82	63	74	81	88	86	65	85	52	80	75	96	71	86	

Figura 8. Índice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras para Preservación de Flora y

Fauna - ICAMPFF

Fuente: Autores



Se hizo la suposición de que la Ciénaga podía ser evaluada como agua marina debido a que su porcentaje de salinidad fue superior a 30 después de la implementación de la Bocana Estabilizada de Mareas (antes en promedio era 16.12). De la figura 8 se puede mencionar que se presentan condiciones Adecuadas en un 56% de los datos, seguido de la Aceptable y Óptima con un 19%, e Inadecuada con tan solo un 6%. Con la implementación del Emisario Submarino, a pesar de que aumenta la presencia de condición Adecuada a un 60%, disminuye la Óptima a 8% y aumenta la Aceptable e Inadecuada en un 25% y 7% respectivamente. Lo anterior, pone en duda las condiciones de propagación de vida acuática en el estuario, debido a que por ejemplo, puntos ubicados en la Zona Sur que habían tenido mejoras como P2, P4 y P7, para el 2014 bajan su calidad a Media, aunque otros puntos ubicados en la Zona Norte como E3, P10 y P28 arrojan gratos resultados con condiciones Adecuadas y Óptimas. Sin embargo, los resultados no son en su totalidad confiables debido a que la Ciénaga es considerada como un cuerpo de agua estuarina y no marina por la entidad INVEMAR.

Al comparar los resultados obtenidos con el ICA y el ICAMPFF se notó una gran diferencia, debido a que por ejemplo, mientras una DBO inferior a 4.5 mg/l es pésima o muy mala para la vida acuática, para contacto humano es media. Además, para el ICAMPFF las reducciones del porcentaje de saturación de Oxígeno Disuelto de 60% son inadecuadas y generan efectos negativos sobre la biodiversidad, el crecimiento, la reproducción y la actividad de distintas especies. Valores del mismo entre 7 y 9 mg/l presenta condiciones óptimas en el estuario, en cambio para el ICA es desde 3.5 hasta 4.8 mg/l. Además, niveles superiores a 65 mg/l de Sólidos Suspendidos Totales para ICAMPFF pueden resultar dañinos a los hábitats y causar condiciones anaerobias en los lagos, ríos y mares, debido a la descomposición de los sólidos, reduce la penetración de luz solar al cuerpo estuarino, disminuye la columna de agua y genera problemas de colmatación (SIAM, 2014); en cambio para permitir el contacto humano una condición mala se empieza a presentar en 370 mg/l.

Luego del anterior análisis, se procedió a escoger uno de los dos indicadores para continuar con el estudio. Fue escogido el índice ICA, debido principalmente a que el ICAMPFF implementado por el INVEMAR, determina el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas, que describen el estado de un cuerpo de agua marino con relación a las



condiciones ambientales que propician la preservación de la flora y la fauna, es decir, su capacidad de soportar la vida marina y los procesos biológicos (Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2009). A su vez, permite conocer la supervivencia de las especies, los procesos biológicos de producción y la subsistencia de las comunidades que habitan dentro de un sistema lagunar (Sistema de Información Ambiental Marina - SIAM, 2014). Sin embargo; para este estudio de la Ciénaga se pretende dar un enfoque dirigido hacia el uso que permita el aprovechamiento de la misma por parte de los habitantes y turistas.

Además, los resultados no estarían acordes con lo esperado porque la utilización del ICAM no es recomendado en aguas típicamente continentales o estuarinas, o donde la salinidad fuese inferior a 25, aunque con la construcción de la Bocana Estabilizada de Mareas, la salinidad aumentó de un 16.12 unidades a 29.34 en promedio. Además, el margen de confianza del resultado disminuye, así como su representatividad objetiva con la ausencia de datos, y en este estudio se presentaron muchos de estos casos. (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” - INVEMAR, 2012).

6.1.2 Análisis a partir de ICA

Los datos obtenidos para cada época desde 1999 hasta 2014 del índice de calidad escogido, fueron representados en gráficos de barra, tal como se muestra en las Figuras 9 y 11, que corresponden a las zonas Norte y Sur del estuario, respectivamente. Dichas gráficas fueron delimitadas con los colores correspondientes de acuerdo a las categorías fijadas por el ICA.

Categoría	Rango
Excelente	91 – 100
Buena	71 – 90
Media	51 – 70
Mala	26 – 50
Muy Mala	0 – 25

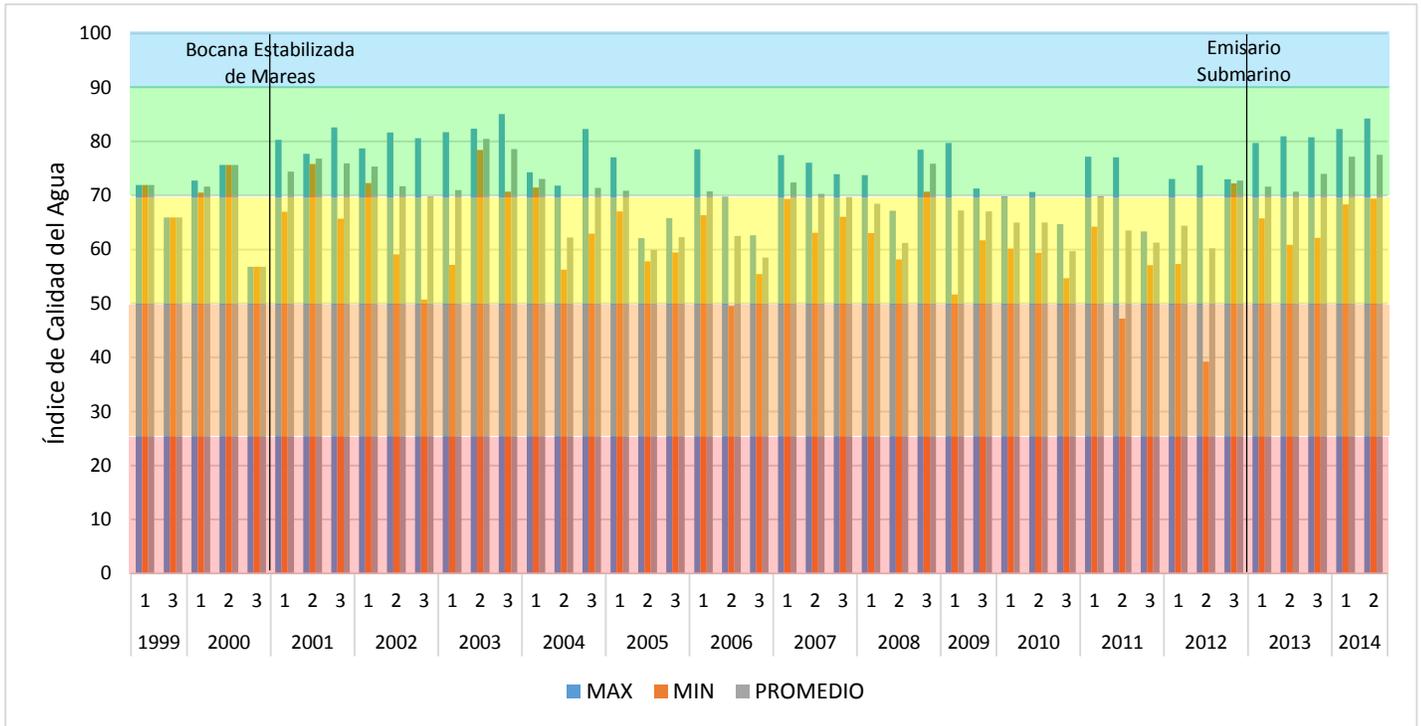


Figura 9. ICA vs Años desde 1999 hasta 2014 – Zona Norte

Fuente: Autores

A partir de la Figura 9 se evidencia como a lo largo de todos los años para la Zona Norte el máximo y el mínimo de los índices calculados se mantuvieron entre las categorías Media y Buena, con excepción de los mínimos para las épocas de transición de los años 2004, 2011 y 2012. Además, luego de la construcción del Emisario Submarino el promedio se mantuvo en categoría Buena en todas las épocas. Sin embargo; sería conveniente realizar diagnósticos para evaluar las características del estuario, y continuar con los monitoreos para verificar si más adelante se alcance una calidad Excelente del agua, que resulta ser la deseada.

Lo anterior se puede consolidar al observar las frecuencias con que se presentaron dichas categorías (Figura 10). En dos de los tres períodos discriminados, más del 50% de los ICA corresponden a calidad Buena, obteniendo tan sólo un 3% de frecuencia en la categoría Mala para el período comprendido entre la Bocana y el Emisario (porcentaje poco significativo), por lo que las frecuencias fueron de 49% para calidad Media y 48% para Buena.

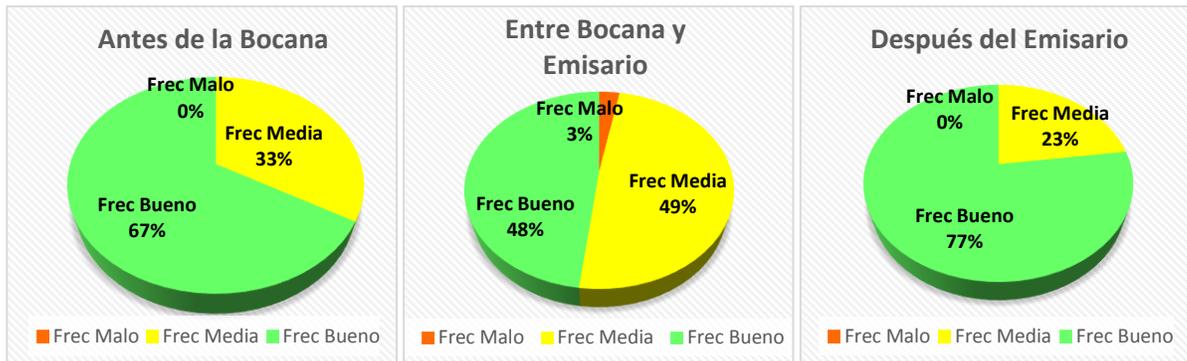


Figura 10. Frecuencias de Categorías ICA obtenidas en zona Norte entre 1999-2014

Fuente: Autores

Algo diferente sucede en la Zona Sur (Ver Figura 11), donde los máximos y mínimos del ICA oscilan entre las zonas de categoría Mala y Media, con excepción de los primeros tres años posteriores a la construcción de la Bocana y luego de la construcción del Emisario, donde ya se notan índices dentro de la categoría Buena.

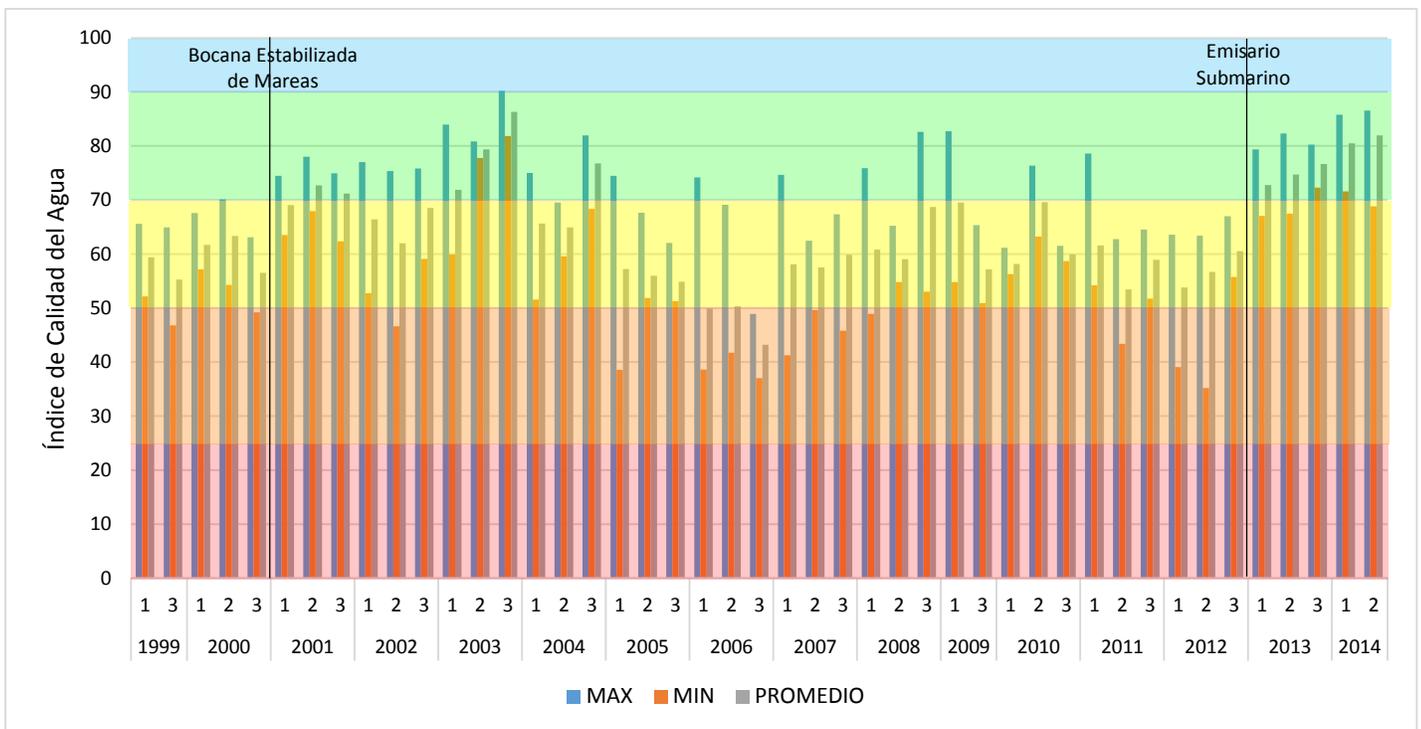


Figura 11. ICA vs Años desde 1999 hasta 2014 – Zona Sur

Fuente: Autores



Así, al analizar la Figura 12 que corresponde a las frecuencias de dichas categorías, se puede mencionar que prima la categoría Media en los dos primeros períodos, y el porcentaje de Mala (10% para antes de Bocana y 13% entre Bocana y Emisario) es alto comparado con el de la Zona Norte. Sin embargo; luego del Emisario el comportamiento es similar a la zona Norte puesto que la frecuencia de calidad Buena es mucho mayor a la de Media.

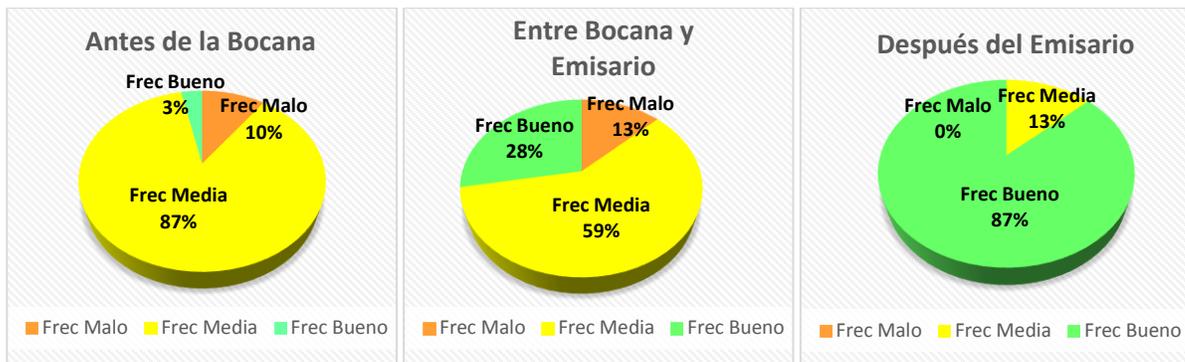


Figura 12. Frecuencias de Categorías ICA obtenidas en zona Sur entre 1999-2014

Fuente: Autores

6.1.3 Análisis Estadístico de Datos (Medidas de Posición y Dispersión)

Con el fin de comparar el conjunto de datos recopilados en el estudio, se calcularon distintas medidas estadísticas de posición y dispersión. Entre ellas la media aritmética, percentiles, varianza y desviación. En las Tablas 9, 10 y 11 se consignan los valores obtenidos con respecto al índice de calidad escogido (ICA) para cada uno de los puntos estudiados, antes de la Bocana, entre la Bocana y el Emisario, y después del Emisario respectivamente.



ANTES DE BOCANA									
Puntos	P2	P4	P5	P6	P7	P8	P10	P22	P28
No de Datos	5	5	5	5	5	5	5	1	0
Media	54.0	60.3	59.6	53.6	63.2	64.9	68.6	70.5	
Varianza	38.2	12.3	30.5	14.1	17.2	28.1	56.1		
Desviación	6.2	3.5	5.5	3.8	4.1	5.3	7.5		
Valor Mínimo	46.8	56.3	51.2	48.0	56.7	56.1	56.8	70.5	
Valor Máximo	60.4	64.7	64.9	57.1	67.2	70.1	75.7	70.5	
Rango	13.6	8.4	13.7	9.2	10.4	14.0	18.9		
Percentil 25	48.0	57.4	54.2	50.0	59.2	60.5	61.4		
Percentil 50	53.4	58.7	61.1	54.3	64.6	65.6	71.9	70.5	
Percentil 75	60.2	63.9	64.2	56.9	66.5	68.8	74.2		

Tabla 9. Medidas estadísticas de ICA antes de construcción de la Bocana

Fuente: Autores

Como se observa en la Tabla 9, antes de la construcción y operación de la Bocana Estabilizada de Mareas, la varianza para los puntos P2, P5, P8 y P10 fue mayor en comparación con los otros, tal como se evidencia en los valores de los percentiles, donde los datos presentan diferencias hasta mayores de 10 puntos entre los percentiles 25 y 75. Y en general, para los puntos restantes (P4, P6 y P7) puede considerarse que el ICA oscilaba entre rangos relativamente pequeños. Además se comprueba que para este período la Ciénaga se encontraba dentro de una categoría Media, ya que el promedio del ICA para cada uno de los puntos osciló entre 51 y 70.

Por otra parte, para el período comprendido entre la Bocana y el Emisario Submarino, aunque casi todos los puntos (con excepción de P10) se mantuvieron en categoría Media, la varianza y la desviación fueron muy altas, siendo los puntos más críticos P8 y P5, seguidos por P22. Es menester mencionar, que al verificar dicha varianza en este periodo fueron negativas con respecto a la mejora de la calidad del agua, ya que en particular P8 y P5 presentaban en promedio condiciones Buenas al principio y luego fueron cambiando a Media y hasta Mala en el año 2006 y para el tiempo de construcción del Emisario Submarino, por la concentración de vertimientos que se hicieron cercanas a estos puntos. Esto también se evidencia en el cálculo de los percentiles y el rango, lo que indica gran dispersión en los datos



(Ver Tabla 10). Por su parte, el punto P10 tuvo el menor de los rangos y con una media de 72.73 se ubica en la categoría Buena de acuerdo con la escala del ICA.

ENTRE BOCANA Y EMISARIO									
Puntos	P2	P4	P5	P6	P7	P8	P10	P22	P28
No de Datos	35	35	31	35	35	31	35	32	35
Media	58.1	65.0	64.8	59.1	61.5	68.0	72.7	68.5	64.9
Varianza	126.4	102.0	703.2	105.4	98.9	778.2	49.1	568.6	55.4
Desviación	11.2	10.1	26.5	10.3	9.9	27.9	7.0	23.8	7.4
Valor Mínimo	38.6	46.7	40.9	38.6	37.0	35.2	57.3	39.3	49.5
Valor Máximo	83.6	88.6	90.2	89.0	81.8	84.7	82.4	85.1	80.6
Rango	45.0	41.9	49.3	50.5	44.8	49.5	25.1	45.8	31.1
Percentil 25	50.9	57.7	54.8	53.8	54.8	61.6	67.1	62.3	59.1
Percentil 50	58.0	64.2	63.7	59.1	60.2	73.0	73.8	69.7	66.0
Percentil 75	63.4	71.5	75.8	63.5	68.2	75.4	78.5	77.6	70.7
Percentil 90	74.9	80.1	79.8	72.2	77.0	82.7	81.7	79.8	74.2

Tabla 10. Medidas estadísticas de ICA en el período entre Bocana y Emisario

Fuente: Autores

Por último, luego de la construcción del Emisario, los valores de calidad para cada uno de los puntos, presentan una gran mejoría en cuanto a los rangos en los que se manejan, ya que la condición media no es inferior a 60. A su vez, los datos presentan una baja varianza y por lo tanto baja desviación. Se debe resaltar que a partir del percentil 50, el 50% de los datos de todos los puntos con excepción de E1, P6 y P8 presentan condiciones buenas (Ver Tabla 11).

DESPUÉS DE EMISARIO																
Puntos	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	P2	P4	P5	P6	P7	P8	P10	P22	P28
No de Datos	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Media	78.6	72.1	77.3	77.9	75.8	69.1	73.2	77.7	81.7	80.4	70.6	77.4	79.5	74.1	80.1	66.8
Varianza	68.8	51.6	36.3	40.3	36.0	31.9	17.5	30.0	14.6	28.5	5.6	13.4	13.6	26.9	0.5	15.8
Desviación	8.3	7.2	6.0	6.3	6.0	5.6	4.2	5.5	3.8	5.3	2.4	3.7	3.7	5.2	0.7	4.0
Valor Mínimo	71.2	67.1	71.3	71.1	69.0	60.9	67.5	70.6	77.5	72.2	68.8	71.9	74.5	65.8	79.2	62.1
Valor Máximo	86.6	82.5	83.5	84.2	81.4	73.8	77.6	85.6	86.0	85.8	74.0	80.6	82.5	79.2	80.9	71.2
Rango	15.4	15.4	12.2	13.1	12.4	13.0	10.1	15.0	8.5	13.6	5.2	8.6	8.0	13.4	1.7	9.0
Percentil 25	71.3	67.2	71.7	71.8	69.9	63.3	69.0	73.1	78.6	75.8	68.8	73.7	75.5	69.7	79.5	62.6
Percentil 50	78.3	69.5	77.1	78.1	76.4	70.7	73.8	77.0	79.9	80.3	69.3	79.0	81.4	74.4	79.9	68.3
Percentil 75	86.2	79.8	83.0	83.8	81.1	73.1	76.7	82.5	85.8	85.1	73.2	80.4	82.4	78.4	80.8	70.3

Tabla 11. Medidas estadísticas de ICA luego de construido el Emisario

Fuente: Autores



Dentro de este análisis también se determinó la frecuencia con que cada punto estudiado se presentaba en determinada categoría de acuerdo al rango establecido según el ICA, al transcurrir de los años. Lo anterior se resume en las siguientes gráficas.

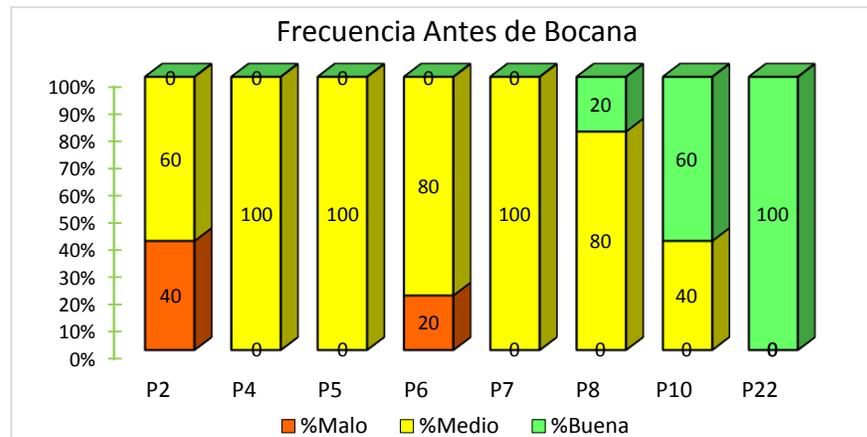


Figura 13. Frecuencias por categoría según ICA antes de la Bocana

Fuente: Autores

De la Figura 13 se puede mencionar que sólo dos (P2 y P6) del total de puntos estudiados mostraron valores en el rango de categoría Mala con un total del 40 y 20% de frecuencia, respectivamente. Esto se debe a que dichos puntos recibían vertimientos de aguas residuales de caños y colectores. Sin embargo; los rangos Medio y Bueno fueron mayoría para el total de los puntos, con frecuencias de hasta 100% para el caso de P4, P5 y P7 para el primero y P22 con un 100% de Bueno aunque cabe resaltar que sólo se tomaron muestras en el período de sequía del año 2000.

Luego de la construcción de la Bocana, las frecuencias de calidad Mala del estuario se presentaron en casi todos los puntos, con excepción de P10, aunque con menores porcentajes con respecto a la calidad Media. No obstante; se nota una mejoría en el caso de P2 y P6 al disminuir los porcentajes de frecuencias Mala en un 20% y 14% respectivamente, y al aparecer categorías Buenas en la totalidad de los puntos estudiados, donde P10 sigue teniendo el mayor porcentaje de bueno (Ver Figura 14).

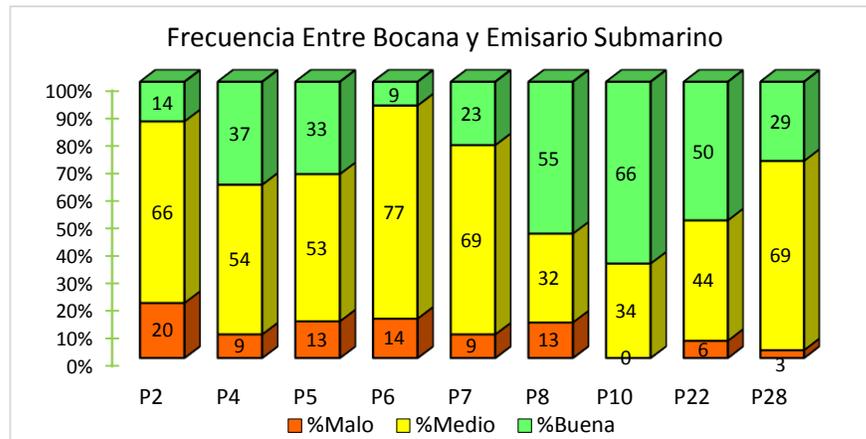


Figura 14. Frecuencias por categoría según ICA entre Bocana y Emisario

Fuente: Autores

Finalmente con la construcción y operación del Emisario Submarino, desaparecen las frecuencias para la categoría Mala, y con excepción de P6 y P28 la frecuencia para la calidad Buena es superior o igual al 50% en el resto de los puntos, alcanzando incluso el 100% en E0, E2, E3, P2, P4, P5, P7, P8 y P22 (56% del total de puntos estudiados) (Ver Figura 15).

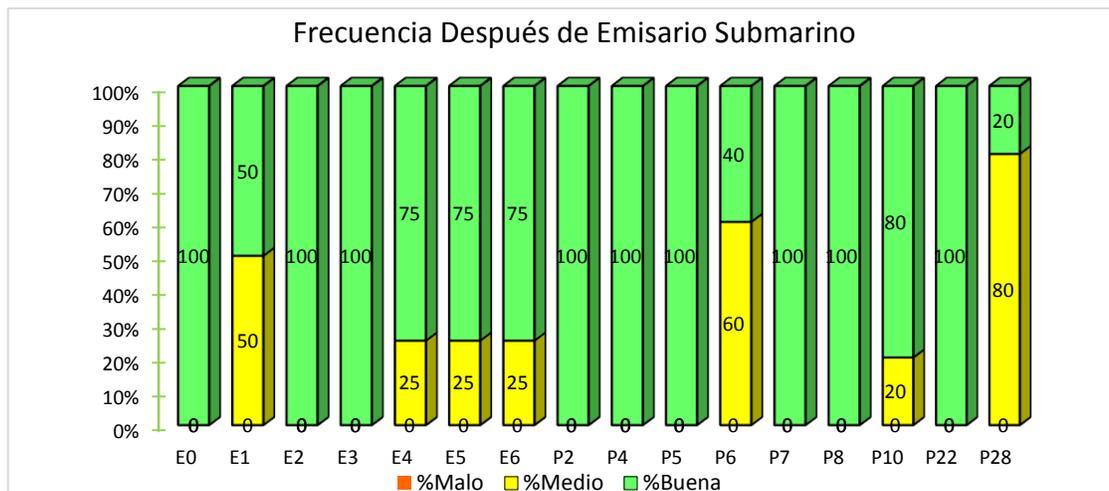


Figura 15. Frecuencias por categoría según ICA antes de la Bocana

Fuente: Autores

Así, los puntos con más diferencias en su comportamiento fueron los de la Zona Sur (P2, P4, P5, P6, P7 y P8), los cuales pasaron de presentar frecuencias en las categorías Mala y Media



a obtener frecuencias del 100% en el rango de la categoría Buena, lo que permite suponer el impacto significativo que ha representado la construcción y operación del Emisario Submarino, y la mejora que puede tener o no en un futuro de todas las zonas del estuario.

6.1.4 Determinación de Índice de Calidad a partir de la Modelación de Acuacar para el periodo posterior a la implementación del Emisario Submarino.

Con el fin de investigar y simular la calidad de agua de la Ciénaga considerando diferentes escenarios futuros de descarga de aguas residuales al estuario, la entidad Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. delegó la preparación y que se corriera el modelo matemático Mike21 por parte de Haskoning Nederland BV EN EL 2002. El modelo fue alimentado con una serie de parámetros como batimetría, descripción del área, tiempo de simulación, elevación de la superficie, resistencia del fondo, viscosidad de Eddy, radiación de oleaje, condiciones de borde y del viento y especificaciones de fuentes y de “output” (resultados del modelo) (Aguas de Cartagena S.A., 2002).

Ahora bien, para comprobar que se están cumpliendo con los propósitos de calidad a partir del Emisario Submarino, se procedió a convertir la simulación de la época seca luego del Emisario Submarino en índices de calidad, para un escenario en el que tan solo existen 10% de las descargas de agua residual en la Ciénaga, las cuales corresponden a las descargas ilegales que aún realizan habitantes aledaños al estuario que no cuentan con servicio de alcantarillado (Ver Anexos 1). Para realizar lo anterior se convirtieron los parámetros de coliformes totales, coliformes fecales, oxígeno disuelto, DBO5, nitratos y fosfatos en valores de calidad ICA con ayuda del software ArcGIS.

6.2 DETERMINACIÓN DEL USO DEL CUERPO DE AGUA DE LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN A PARTIR DE NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Para determinar el uso que puede tener actualmente la Ciénaga, se consideraron los criterios de calidad expuestos en normas nacionales e internacionales vigentes. Dentro de las normas nacionales se encuentran el Decreto 1594 de 1984, por medio del cual se reglamenta en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Como normas internacionales se tuvieron en



cuenta los estándares fijados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) para aguas de recreación de contacto primario (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 2000).

De acuerdo con el Decreto 1594 de 1984, dependiendo de la destinación del recurso hídrico, así mismo se designan valores máximos permisibles para cada uno de los parámetros, tal como se muestra en la Tabla 12. Cabe mencionar que los límites para consumo humano con tratamiento convencional o desinfección no se tendrán en cuenta, puesto que la Ciénaga no es considerada como una fuente de agua potable.

Parámetro	Unidad	Uso Recreativo Contacto Primario	Uso Recreativo Contacto Secundario	Preserv. Flora y Fauna	Consumo Humano con Tratamiento Convencional	Consumo Humano con Desinfección
Colif Fecales	NMP/100 ml	200			2000	
Colif Totales	NMP/100 ml	1000	5000		20000	1000
Nitrato	mg/l				10	10
pH	unds	5.0-9.0	5.0-9.0	6.5-8.5	5.0-9.0	6.5-8.5
OD	mg/l			4		

Tabla 12. Valores límites de algunos parámetros de acuerdo al uso del recurso hídrico

Fuente: Autores

Entre otros usos que no fueron mencionados en la tabla 11 se encuentran uso agrícola y pecuario, los cuales no fueron evaluados en la Ciénaga por falta de datos ya que se necesitan elementos tales como Aluminio, Arsénico, Cromo, Plomo, entre otros, los cuales no son evaluados por las entidades de Acuacar o EPA.

Ahora bien, con el fin de determinar qué zonas cumplen con las normas y asignar un posible uso a la Ciénaga, se elaboraron distintas tablas correspondientes a cada uno de los parámetros estudiados que ésta abarca. De esta manera, al comparar los valores presentados en el estuario con respecto a coliformes fecales y totales con lo establecido en las normas, se pudo elaborar la Tabla 13 que discrimina los distintos puntos estudiados divididos en Zona Norte y Zona Sur por la Bocana Estabilizada de Mareas, y tres períodos de tiempo (Antes y Después de la construcción de la Bocana, y después del Emisario).



Parámetro	Zona	Fuente	Punto	Antes Bocana Estabilizada 1999 - 2000	Durante Bocana Estabilizada 2001 - 2012	Después de Emisario				
						2013			2014	
						1	2	3	1	2
Coliformes Fecales o Termotolerantes (NMP/100 ml)	NORTE	ACUACAR	E2			1022.50	27.67		2.75	2.00
		ACUACAR	E3			1039.00	2.00		2.00	2.00
		ACUACAR	E4			2272.50	2.00		4.25	5.67
		ACUACAR	E5			2022.50	275.00		200.00	172.00
		ACUACAR	E6			1022.50	20.67		18.67	204.33
		EPA	P10	152.22	197	376.35	5.55	1.80	31.83	
	EPA	P22	110	3875	27.80	4.30	1.80	27.20		
	EPA	P28		2107	112.50	121.50	23.00	436.53		
	SUR	ACUACAR	E0			1022.50	9.00		2.75	2.00
		ACUACAR	E1			1022.50	921.00		4059	5.00
		EPA	P2	59375	208107	5523.20	70.50	130.00	84.67	
		EPA	P4	9433	10057	502.03	25.50	7.80	3.47	
		EPA	P5	5458	18687	127.08	11.55	11.00	2.70	
		EPA	P6	16788	106587	476.85	360.00	130.00	68.00	
		EPA	P7	1947	26098	428.33	11.90	20.00	3.27	
		EPA	P8	1149	4045	67.85	2.00	4.50	9.40	
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	NORTE	ACUACAR	E2			2273	27.67		2.75	2.00
		ACUACAR	E3			1039	2.00		2.00	2.00
		ACUACAR	E4			3923	2.00		4.25	7.00
		ACUACAR	E5			2039	445.00		225.0	252.00
		ACUACAR	E6			1023	20.67		18.67	242.33
		EPA	P10	7537	4231	568	11.90	7.80	49.17	
	EPA	P22	200	8949	1464	4.30	1.80	220.0		
	EPA	P28		6942	1376	241.50	23.00	436.53		
	SUR	ACUACAR	E0			1023	9.00		3.75	2.00
		ACUACAR	E1			2023	921.00		4059	10.33
		EPA	P2	274006	297277	16622	81.50	130	171.33	
		EPA	P4	37163	30967	35003	40.50	23	4.87	
		EPA	P5	26194	74697	7756	11.55	33	2.70	
		EPA	P6	43425	294617	4004	765.00	270	106.33	
		EPA	P7	16868	56717	978	55.90	130	4.00	
		EPA	P8	16836	39022	6227	7.50	8	79.00	

Uso	Coliformes Fecales
Contacto Primario	200

Uso	Coliformes Totales
Contacto Primario	1000
Contacto Secundario	5000

Tabla 13. Usos por puntos de acuerdo a lo fijado en el Decreto 1594 de 1984 para Coliformes Fecales y Totales

Fuente: Autores

A partir de lo mostrado en la Tabla 13 se observa que para el 2013 – 2014, el posible uso del estuario es Contacto Primario de acuerdo a Coliformes Fecales y Totales. Es evidente que el valor de ambos coliformes disminuye para la segunda época de 2013, destacándose por ejemplo en el caso de los Coliformes Fecales los puntos E4, E5 y P2, que superaban valores por encima de 2000; y para coliformes Totales P4 que superaba valores por encima de 30000.

Además se observa que antes y después de la construcción de la Bocana hasta el año 2012, la mayoría de los puntos no cumplía con lo reglamentado por la Norma, por lo que se logró



una mejora con la implementación del Emisario Submarino, aunque para la sequía del período de 2014, el valor de coliformes fecales y totales para E1 era superior a 4000 NMP/100ml, por lo que sería importante hacer un seguimiento y encontrar las razones, ya que para el segundo periodo sus valores bajan significativamente hasta uso con contacto primario. Es importante mencionar, que luego de la implementación de la Bocana y antes del Emisario, aumentó el valor de coliformes fecales para todos los puntos estudiados presentando momentos críticos referentes a altas concentraciones. Con respecto a los totales, solo el 25% de los datos (P4 y P10) mejoró disminuyendo el valor de coliformes.

Por otra parte, con el fin de establecer una comparación entre las Zonas (Norte y Sur) en que se dividió la Ciénaga, se calcularon promedios para cada una de los años estudiados entre los puntos que se incluyeron en dichas zonas. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 16 y 17.

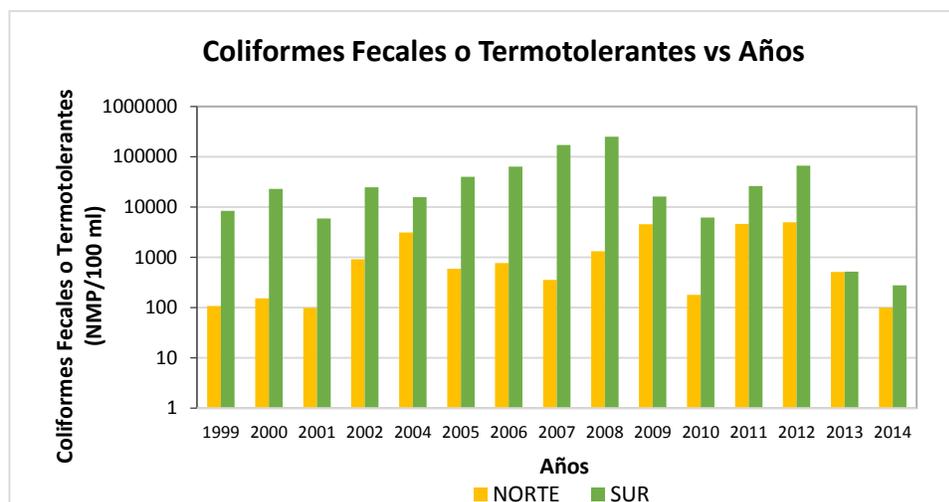


Figura 16. Promedio de Coliformes Fecales para Zona Norte y Sur del estuario

Fuente: Autores

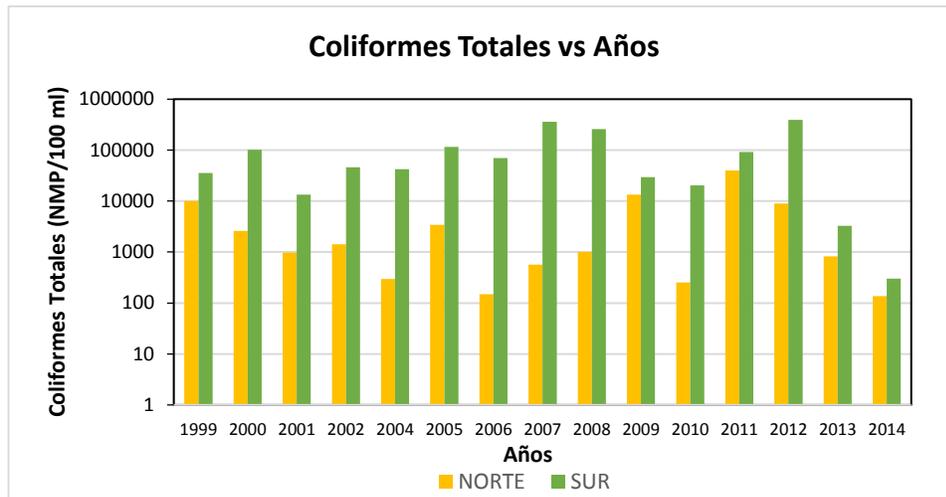


Figura 17. Promedio de Coliformes Totales para Zona Norte y Sur del estuario

Fuente: Autores

Se puede observar que tanto para Coliformes Fecales como Totales, la zona Sur de la Ciénaga siempre presentó los mayores valores a lo largo de los años. Esto se debe precisamente a que es la más afectada, puesto que recibía directamente los vertimientos de aguas residuales del alcantarillado de la ciudad por cada uno de los canales en el perímetro urbano, además de los arroyos existentes en la zona rural y los vertimientos informales que aún se presentan.

Cabe mencionar que desde el año 2004, el Banco Internacional de Reconstrucción y Desarrollo, y el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado en el Distrito de Cartagena, han elaborado proyectos que suponen el mejoramiento de los servicios de abastecimiento de agua y alcantarillado de la ciudad y las condiciones sanitarias de la población de menores recursos. Sin embargo; actualmente se presentan problemas de esta índole en algunas viviendas o barrios ubicados en los alrededores de la Zona Sur de la Ciénaga, y que representan el 10% de vertimientos de aguas residuales que llegaban a la misma antes de la implementación del Emisario. Lo que supone la ausencia de propuestas o acciones que solucionen la problemática de la población afectada.



Ahora bien, con respecto a los valores permisibles establecidos para los otros parámetros mencionados en la norma, se tuvo un total cumplimiento para cada uno de los puntos estudiados, excepto para el Oxígeno Disuelto, donde todos los puntos superan el límite fijado para preservación de Flora y Fauna. Lo anterior se evidencia a continuación.

Parámetro	Punto	Fuente	Antes Bocana Est.	Durante Bocana Est.	Después de Emisario	
			1999 - 2000	2001 - 2012	2013	2014
pH (Unidades)	E0	ACUACAR			7.98	7.88
	E1	ACUACAR			7.82	8.12
	E2	ACUACAR			7.89	8.36
	E3	ACUACAR			8.19	8.24
	E4	ACUACAR			8.25	8.37
	E5	ACUACAR			8.25	8.19
	E6	ACUACAR			8.24	8.22
	P2	EPA	8.44	8.15	8.18	8.12
	P4	EPA	8.48	8.25	8.31	8.22
	P5	EPA	8.52	8.23	8.39	8.21
	P6	EPA	8.42	8.26	8.37	8.25
	P7	EPA	8.63	8.31	8.32	8.28
	P8	EPA	8.60	8.26	8.40	8.25
	P10	EPA	8.52	8.29	8.42	8.35
P22	EPA		8.23	8.38	8.32	
P28	EPA		8.10	8.05	8.28	

Color	Valor pH
Amarelo	5-9 y 6.5-8.5
Rosa	6.5-8.5

Tabla 14. Usos por puntos de acuerdo a lo fijado en el Decreto 1594 de 1984 para pH

Fuente: Autores

De acuerdo con la Tabla 14 ninguno de los valores obtenidos en los promedios de pH, excede los establecidos en el Decreto, por lo que el estuario podría tener distintos usos para 2014, tales como uso recreativo con contacto primario o secundario, o preservación de flora y fauna.



Parámetro	Punto	Fuente	Antes Bocana Est.	Durante Bocana Est.	Después de Emisario	
			1999 - 2000	2001 - 2012	2013	2014
Oxígeno Disuelto (mg/l)	E0	ACUACAR			5.09	6.90
	E1	ACUACAR			5.40	7.17
	E2	ACUACAR			6.26	6.78
	E3	ACUACAR			5.72	6.65
	E4	ACUACAR			5.33	6.98
	E5	ACUACAR			5.34	5.64
	E6	ACUACAR			5.78	6.31
	P2	EPA	7.64	5.70	6.56	7.07
	P4	EPA	8.37	6.60	7.41	7.62
	P5	EPA	8.05	6.94	7.98	7.60
	P6	EPA	5.14	6.12	6.67	6.72
	P7	EPA	8.66	6.59	7.03	7.35
	P8	EPA	8.77	6.71	7.27	6.99
	P10	EPA	9.65	5.97	6.83	6.86
	P22	EPA		5.80	6.61	7.25
P28	EPA		5.16	4.96	6.50	

Color	Valor OD = 4
	< 4
	> 4
	4.00

Tabla 15. Usos por puntos de acuerdo a lo fijado en el Decreto 1594 de 1984 para Oxígeno Disuelto

Fuente: Autores

En el Decreto 1594, el único uso que menciona el parámetro de Oxígeno Disuelto es para Preservación de Flora y Fauna, y establece un límite de 4 mg/l. Sin embargo; para 2014 todos los puntos estudiados superaron dicho valor y se encuentran en un rango de 5.6 – 7.6 (Ver Tabla 15). Esto puede ser, debido a que en los procesos de degradación dominan organismos aeróbicos (Ver Anexo 2: Usos según Emisario).

Por otra parte, de acuerdo con los límites fijados por USEPA para coliformes totales y fecales (Ver Tabla 16), si se cumple con los estándares de calidad microbiológica del agua, referentes a coliformes totales y fecales para aguas de recreación de contacto primario; teniendo como referencias por ejemplo, los límites establecidos en New Hampshire para coliformes totales; y en Indiana y Dakota del Sur para coliformes fecales. Esto con excepción de los puntos P28 y E1. Cabe mencionar que en Estados Unidos cada estado tiene definidos sus límites y éstos difieren en gran medida unos de otros, presentándose para coliformes totales un rango entre ≤ 240 y ≤ 10000 y para coliformes fecales entre ≤ 400 y ≤ 1000 .



Parámetro	Unidad	USEPA
Coliformes Fecales	number/100 MI	≤400 - ≤1000
Coliformes Totales	number/100 MI	240 - ≤10000

Tabla 16. Valores permisibles de algunos parámetros establecidos por USEPA

Fuente: Autores

6.3 ANÁLISIS TENDENCIAL A PARTIR DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Como se mencionó en la metodología, para la representación gráfica de la calidad del agua del estuario y sus posibles usos, se utilizó el software ArcGIS, el cual resumió la información obtenida para cada uno de los puntos estudiados en una serie de mapas. Dichos puntos se encuentran ubicados geográficamente en las coordenadas mostradas en la Tabla 8.

6.3.1 Mapas de Calidad de Agua del Estuario

Teniendo en cuenta el promedio de los índices de calidad obtenidos para cada uno de los períodos discriminados y sus respectivas épocas de sequía, transición y de lluvia (Ver Tabla 17) se elaboraron los siguientes mapas, que representan la calidad del agua del estuario.

Fuente	Punto	Antes de Bocana	Entre Bocana y Emisario	Emisario 2014
ACUACAR	E0			85.74
ACUACAR	E1			77.03
ACUACAR	E2			82.39
ACUACAR	E3			83.27
ACUACAR	E4			80.83
ACUACAR	E5			72.19
ACUACAR	E6			75.48
EPA	P2	55.04	56.81	82.51
EPA	P4	60.99	63.36	85.77
EPA	P5	60.22	62.94	85.12
EPA	P6	53.74	57.76	71.43
EPA	P7	63.85	59.93	80.37
EPA	P8	65.74	65.72	81.95
EPA	P10	69.79	70.83	76.03
EPA	P22	70.54	66.39	79.56
EPA	P28		63.14	68.86



Categoría	Rango
Excelente	91 – 100
Buena	71 – 90
Media	51 – 70
Mala	26 – 50
Muy Mala	0 – 25

Tabla 17. Promedio de ICA para cada período estudiado

Fuente: Autores

En las Figuras 18, 19 y 20 se observan los mapas correspondientes a los períodos anterior a la construcción de la Bocana Estabilizada de Marea, entre esta y el Emisario, y luego de la construcción de este último, respectivamente. En ellas se muestra la calidad Media que se obtuvo durante los dos primeros, y el cambio a calidad Buena con la operación del Emisario.

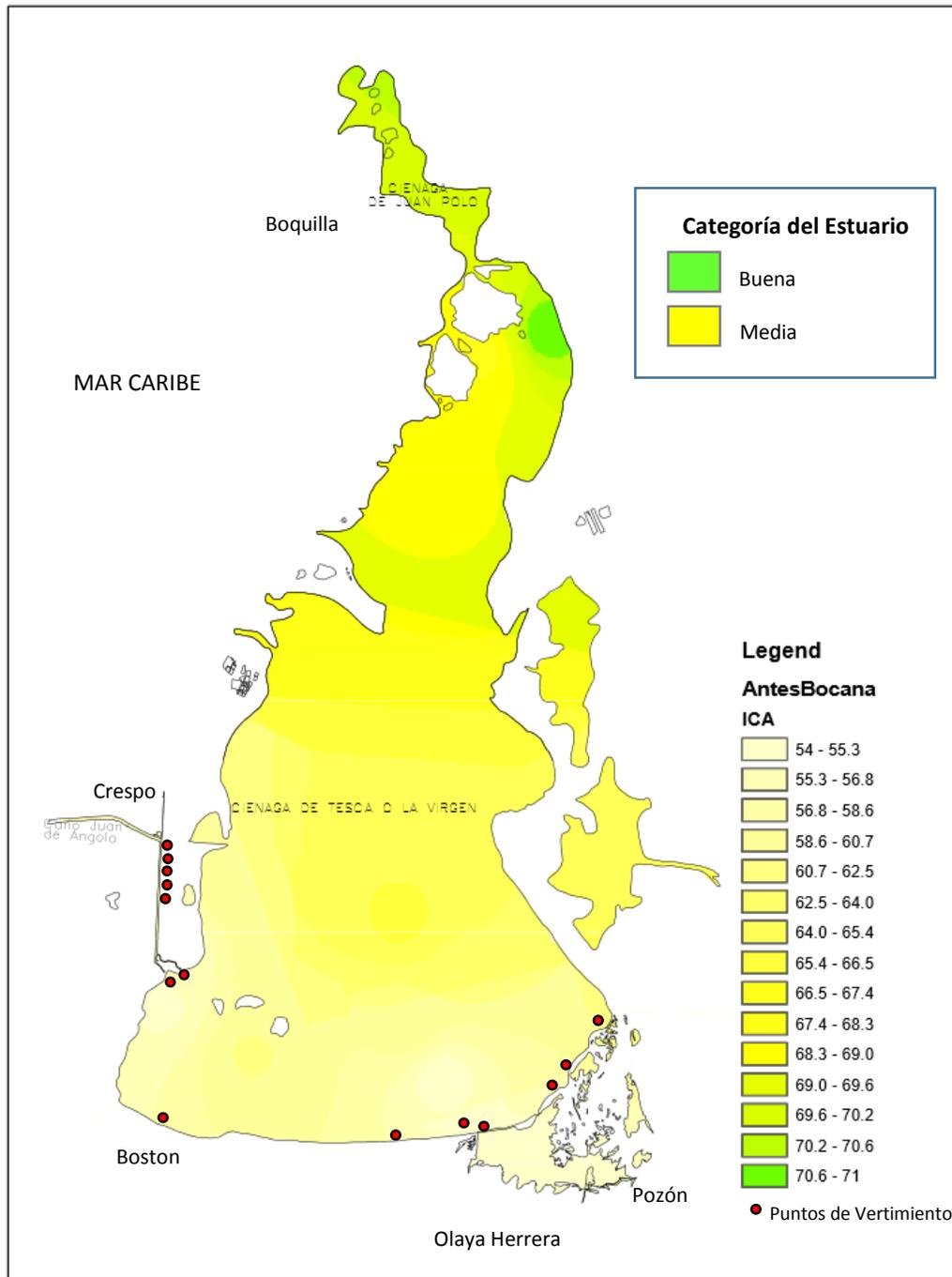


Figura 18. Mapa de calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena antes de la Bocana Estabilizada de Marea

Fuente: Autores

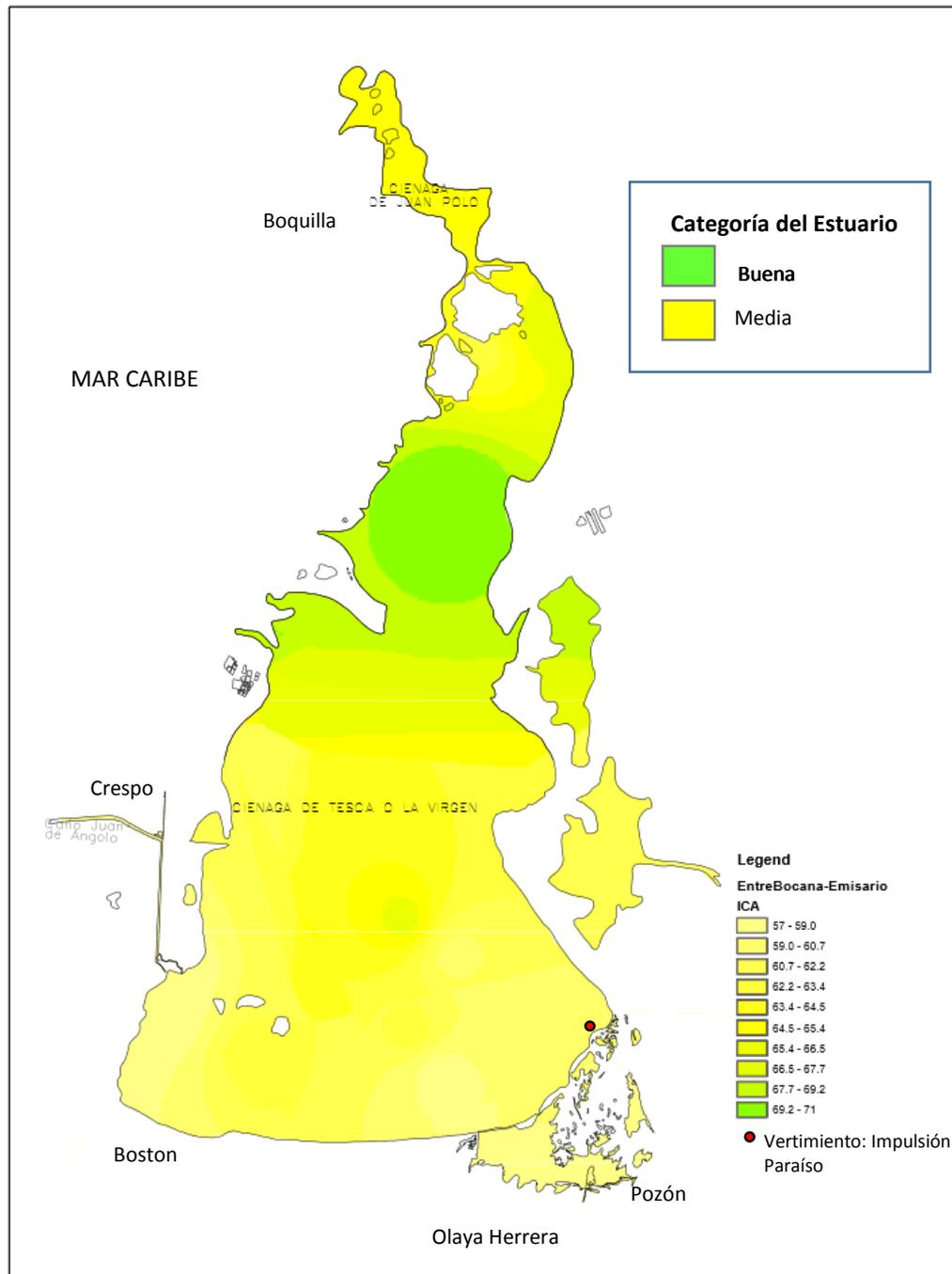


Figura 19. Mapa de calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena durante el período comprendido entre la Bocana y el Emisario Submarino.

Fuente: Autores

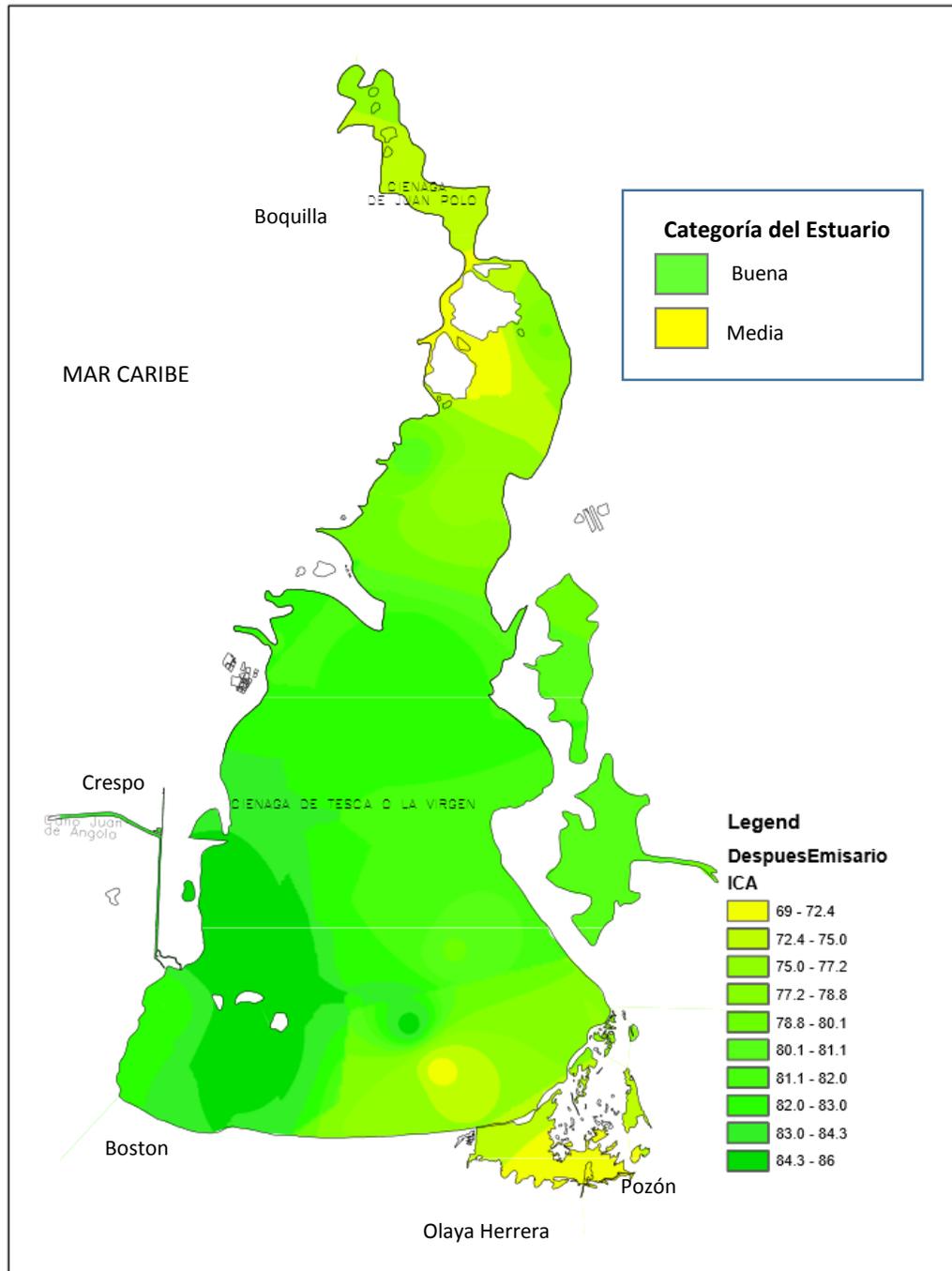


Figura 20. Mapa de calidad del agua de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena luego de la construcción del Emisario Submarino

Fuente: Autores



6.3.2 Mapa de Zonificación de la Ciénaga de acuerdo a sus Usos

Para la zonificación del estuario de acuerdo a los usos que éste puede tener por sus características físicas, químicas y microbiológicas, luego de la implementación del Emisario Submarino, se utilizaron los promedios de Coliformes Fecales y Totales del año 2014, mostrados en la Tabla 18.

Fuente	Punto	2013		2014	
		Coliformes Fecales	Coliformes Totales	Coliformes Fecales	Coliformes Totales
ACUACAR	E0	-	-	2.4	2.9
ACUACAR	E1	-	-	2031.8	2034.4
ACUACAR	E2	-	-	2.4	2.4
ACUACAR	E3	-	-	2.0	2.0
ACUACAR	E4	-	-	5.0	5.6
ACUACAR	E5	-	-	186.0	238.5
ACUACAR	E6	-	-	111.5	130.5
EPA	P2	130.0	130.0	84.7	171.3
EPA	P4	7.8	23.0	3.5	4.9
EPA	P5	11.0	33.0	2.7	2.7
EPA	P6	130.0	270.0	68.0	106.3
EPA	P7	20.0	130.0	3.3	4.0
EPA	P8	4.5	7.8	9.4	79.0
EPA	P10	1.8	7.8	31.8	49.2
EPA	P22	1.8	1.8	27.2	220.0
EPA	P28	23.0	23.0	436.5	436.5

Uso	Coliformes Fecales
Contacto Primario	200

Uso	Coliformes Totales
Contacto Primario	1000
Contacto Secundario	5000

Tabla 18. Promedio de coliformes Fecales y Totales para 2014

Fuente: Autores

Así, los mapas de las Figuras 21 y 22 muestran que la Ciénaga es adecuada para uso recreativo con contacto primario de acuerdo con los Coliformes Fecales. Pero; según los límites de Coliformes Totales algunas zonas admiten sólo contacto secundario.

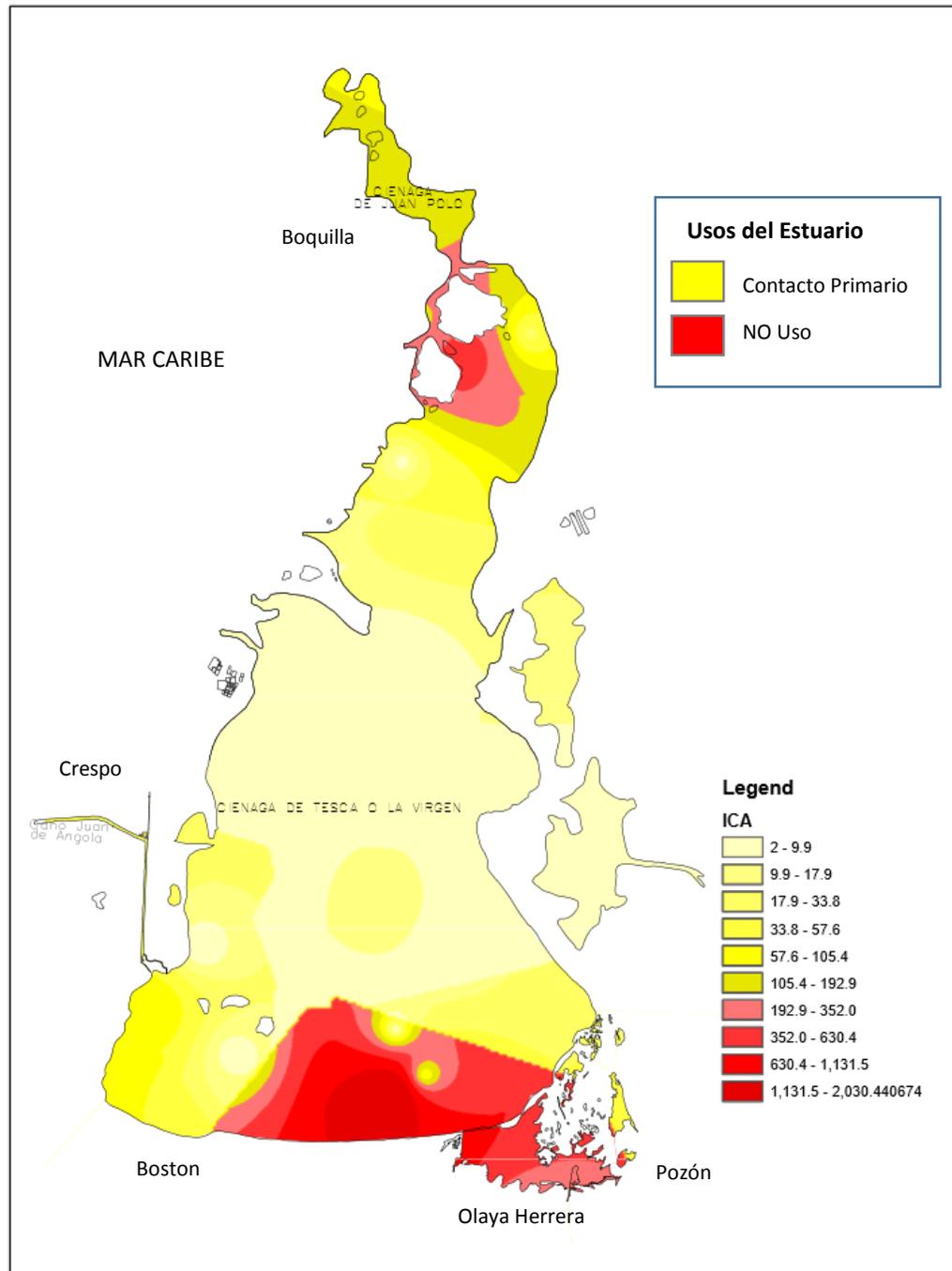


Figura 21. Mapa de usos de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena según Coliformes Fecales

Fuente: Autores

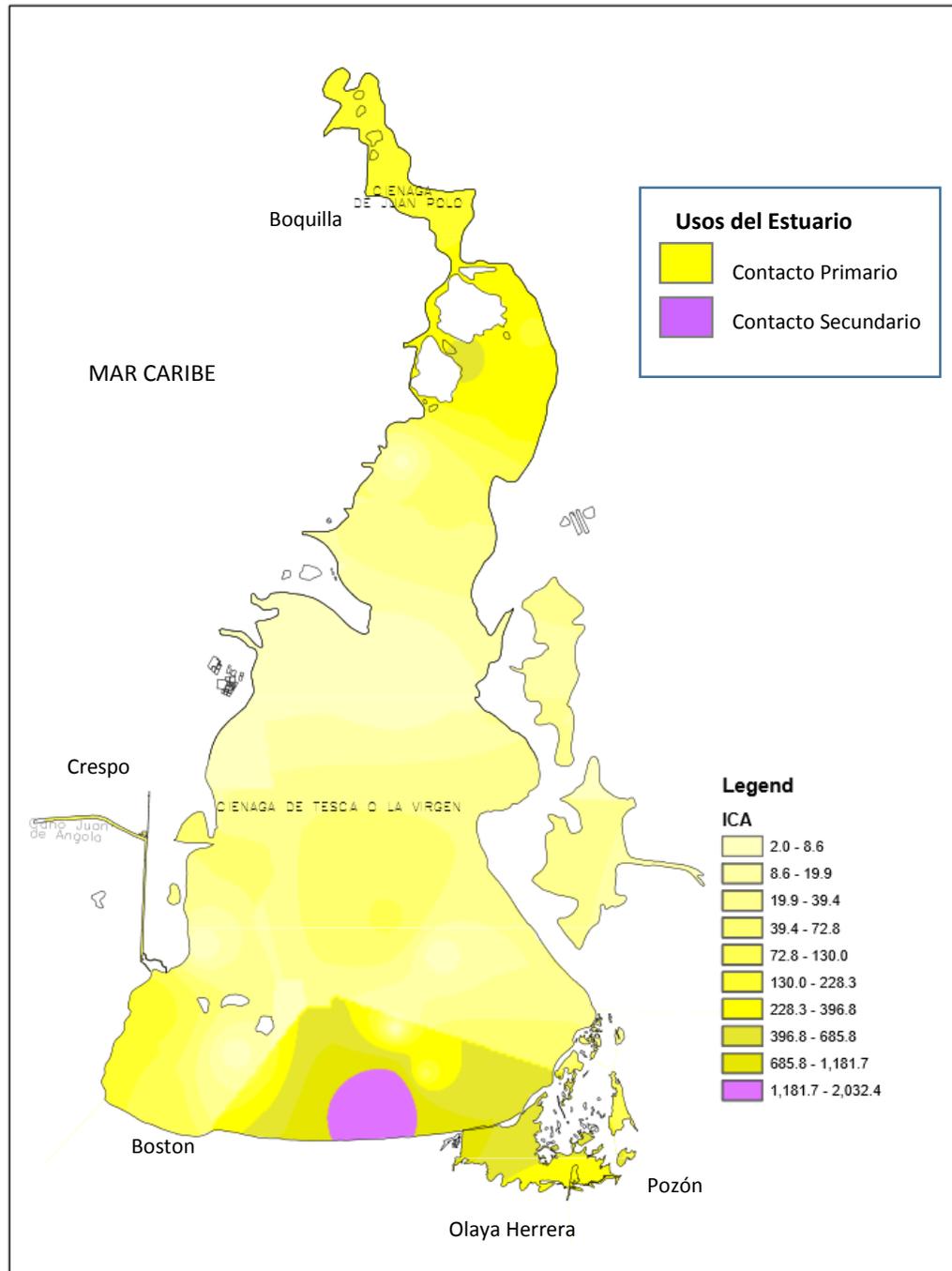


Figura 22. Mapa de usos de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena según Coliformes Totales

Fuente: Autores



Al comparar los resultados obtenidos de acuerdo al uso de la Ciénaga donde se muestra que puede ser usada para contacto primario por todo el estuario, se verifica lo mencionado por la entidad EPA a finales del 2013 en el boletín informativo 979 en el que refieren que al transcurrir un año de operación del Emisario Submarino, se han alcanzado exitosamente las expectativas generadas tras el proyecto y que se ha mejorado la calidad de las aguas de la Ciénaga de la Virgen y a su vez de la Bahía de Cartagena y de canales de la ciudad. Además, registran que las concentraciones de bacterias indicadoras biológicas de presencia de contaminación por aguas residuales a partir de la medición de coliformes termotolerantes y enterococos, son inferiores al límite registrado en la legislación colombiana el cual es de 200 NMP/100 ml concerniente al contacto primario (Comunicaciones ACUACAR, 2013).

6.3.3 Factores Externos al Sistema

La Bocana Estabilizada de Mareas involucra diez (10) compuertas, de las cuales seis (6) permiten la entrada de agua de mar al estuario y cuatro (4) la salida del flujo de agua luego de hacer un recorrido orientado por una ‘Pantalla de Dirección’. Hasta la fecha no se han registrado, ni en noticias ni por parte de entidades reguladoras del mismo, eventos externos al sistema que hayan obligado el cierre parcial o temporal de las compuertas y que en consecuencia justifiquen los valores de Mala calidad para los años 2006 y 2007 como se muestra en la Figura 7. Aunque por ejemplo en el caso del invierno del 2010 y 2011, cuando el Fenómeno de la Niña generó grandes pérdidas y daños a nivel nacional, las fuertes lluvias que se registraron en la ciudad de Cartagena, generaron un aumento en el nivel del agua de la Ciénaga por las inundaciones, tanto que el agua se desbordó por encima de la estructura de las compuertas y por lo tanto no había control en la pantalla de dirección para regular el flujo del mismo (Wikipedia, 2014).

Cabe mencionar, que no sólo para el invierno de 2010 se ha alterado el funcionamiento del sistema, en otras ocasiones a lo largo de los años, se han cerrado temporalmente algunas de las 6 compuertas de entrada de agua de mar a la Ciénaga para facilitar el desagüe de mayores caudales de escorrentía en barrios aledaños a la zona sur del estuario (Blanco, 2014).



Es menester mencionar que con la construcción de la Bocana se buscó estabilizar el cuerpo estuarino mediante la remoción de putrefacción y sólidos suspendidos, conduciéndolos hacia el mar que tiene mayor capacidad de autopurificación. Y así, tener un cuerpo de agua que permanece estable en el fondo en cuanto a sus sedimentos. La Bocana trata aproximadamente el 44% del área total de la Ciénaga. De modo que, se puede afirmar que esta estructura fue construida como un componente para la regulación y estabilización del estuario, mas no para la mejora total de la calidad del agua. Es así como el agua marina permite que se estabilice la salinidad alrededor de 35 mg/l como el agua de mar y evita la permanencia y desarrollo de Coliformes (Beltrán, 2003). A su vez, se contempló su deterioro con el transcurrir del tiempo y su posible desuso tanto por el aumento de la población, y con ello el aporte de agua residual, como por los sedimentos de lodos que se acumulan en la dársena (Paternina, 2014).

Otro factor externo asociado con la contaminación de la Ciénaga es la influencia de los canales que desembocan en la misma. La falta de conciencia ciudadana es el principal detonante que genera suciedad en el cuerpo de agua, lamentablemente en Cartagena es común ver desechos en calles, caños y canales; dicha situación se ve reflejada cuando éstos son arrastrados por el agua lluvia hasta su desembocadura en la Ciénaga (Parra, 2014). Todo ese tipo de sedimentos arenosos y residuos urbanos como objetos plásticos, salen a flote en La Bocana Estabilizada de Mareas, amenazando así con aumentar el nivel de las aguas y exponer a unas 450 mil personas aledañas al estuario a serias inundaciones (Meza, 2014).

En pro de mitigar este problema, al pasar de los años se han realizado limpieza de canales y arroyos naturales como en el caso del mes de Septiembre de 2013 donde Valorización Distrital contrató la limpieza de 13 canales de los cuales 6 corrientes desembocan en la Ciénaga de la Virgen: María Auxiliadora, Ricaurte – Chepa, Matute-Chapundún, Calicanto nuevo, Limón e Isla de León, en el cual se realizó una inversión de \$3.300 millones (Alcaldía de Cartagena, 2013). Más recientemente, se tiene conciencia de que la Bocana hay que defenderla y mejorarla. El Director Regional de MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental propone que para salvar la Ciénaga, autoridades ambientales como el EPA y CARDIQUE, el sector privado y las universidades, tienen que unirse, desarrollar un proyecto de contingencia y presentarlo a Colciencias (Meza, 2014).



6.3.4 Análisis Tendencial de la Calidad del Agua de la Ciénaga de la Virgen

A partir de la mejora que ha presentado la Ciénaga desde la construcción de la Bocana y luego con la implementación y operación del Emisario Submarino, la cual se pudo ilustrar en las Figuras 18, 19 y 20, se puede inferir que la Ciénaga seguirá mejorando su calidad debido al intercambio de flujo que le brinda la Bocana Estabilizada de Mareas con el agua de mar que tiene mayor capacidad de autopurificación, por lo que se considera continúe su funcionamiento. Esto debido a que, el Emisario sólo desvía los vertimientos hacia el Mar Caribe a la altura de Punta Canoas, y es la Bocana quien ayuda con el mejoramiento de la calidad del agua de forma directa. De modo que, gracias al Emisario, ya no existen los grandes caudales de vertimiento de agua residual provenientes de la ciudad.

Cabe resaltar que según información actual respecto a la Ciénaga, se tiene que el Universal publicó una nota en la que anuncia que se realizará un estudio técnico y amplio para delimitar y conocer el estado actual del estuario y poder recuperarlo en su totalidad. Dicho estudio estará a cargo del Instituto Von Humboldt con la Universidad Javeriana y la Fundación Omacha y será acompañada de Cardique, EPA y el Centro de Investigaciones Hidrográficas y Oceanográficas del Caribe (CIOH). Por lo que se esperan los resultados para Mayo de 2015 (El Universal, Estudio piloto para recuperar la Ciénaga de La Virgen, 2014).

6.3.5 Comparación del Impacto de la Construcción y entrada en Operación de la Bocana con el del Emisario Submarino

Se realizó una comparación entre el impacto causado por la entrada en operación de la Bocana con la del Emisario Submarino con respecto a parámetros de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno (Ver Figuras 23, 24, 25 y 26).

En las figuras 23 a 26 se indican las metas de los parámetros respectivos para que no se generen procesos de eutroficación de acuerdo a la implementación de la Bocana o Emisario Submarino con una línea horizontal azul. La línea roja vertical muestra el mes de inicio de operación tanto de la Bocana en Noviembre 25 de 2000 y del Emisario en Enero de 2013.

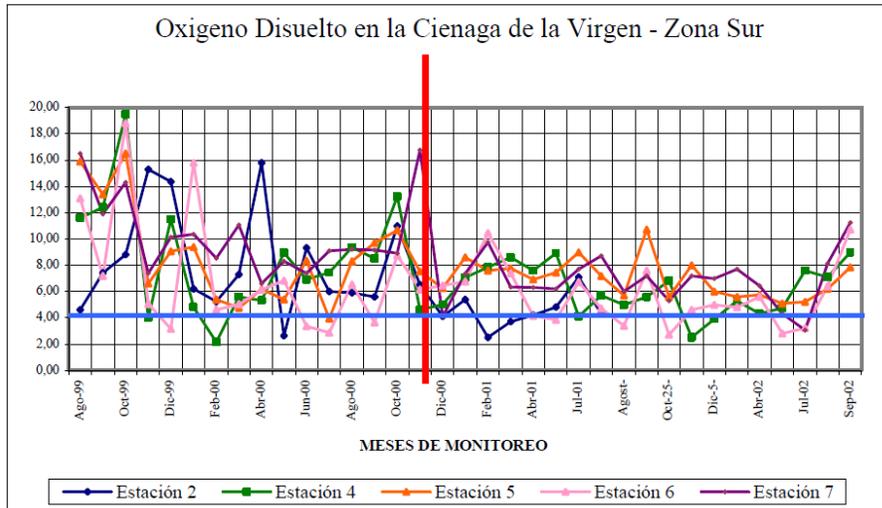


Figura 23. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la Ciénaga de la Virgen entre Agosto 1999 y Septiembre 2002.

Fuente: (Beltrán, 2003)

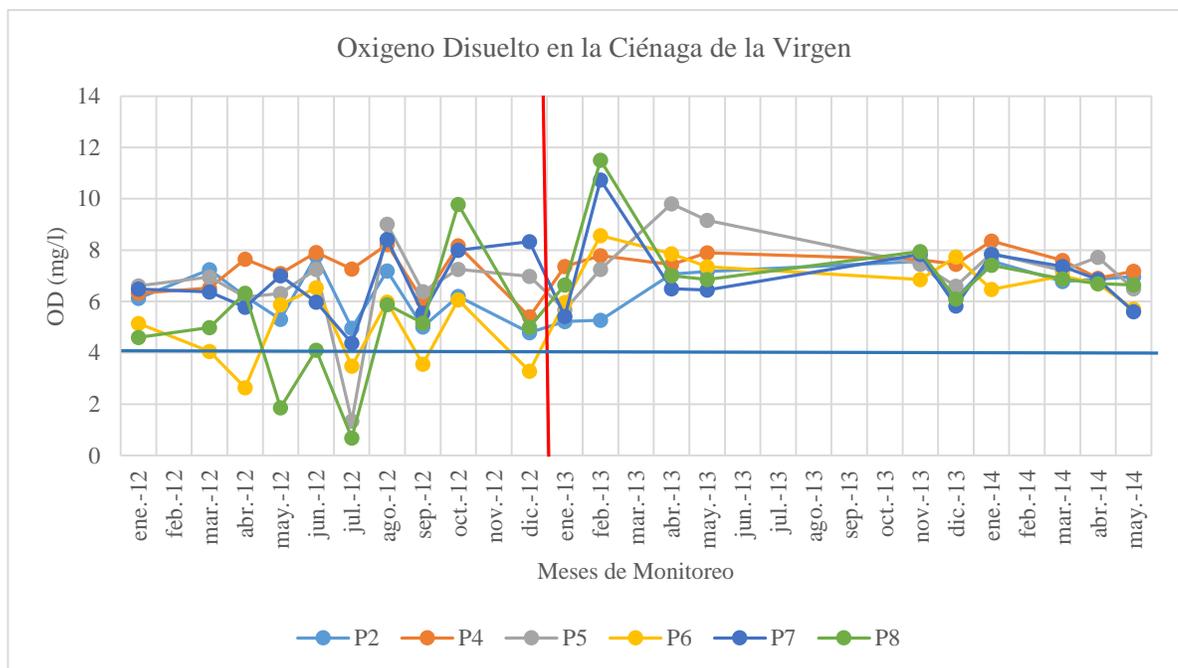


Figura 24. Comportamiento del Oxígeno Disuelto en la Ciénaga de la Virgen entre Enero 2012 y Mayo 2014.

Fuente: Autores



Con la entrada en operación de la Bocana, a pesar de que en su totalidad los valores de oxígeno disuelto no disminuyen hasta la meta trazada de 4 mg/l, sus valores máximos de 20 mg/l pasan a 10 mg/l y oscilan en promedio hasta los 4 mg/l. Los altos valores de oxígeno disuelto antes de la implementación de la Bocana, pueden tender ya sea a altos procesos de eutroficación debido a que los valores de fosfatos llegan hasta 515 mg/l pero los de nitrato si no sobrepasan los 2 mg/l. Cabe mencionar que puntos como P6 presentan valores críticos inferiores hasta de 2,5 mg/l aproximadamente. Por su parte con la implementación del Emisario Submarino, se aprecia en la Figura 24 que sus valores se estabilizaron más rápido que con la implementación de la Bocana, ya que se encuentran entre 6 y 8 mg/l. Para ambos casos el aporte de oxígeno es suficiente para realizar procesos de oxidación de nutrientes en la Ciénaga.

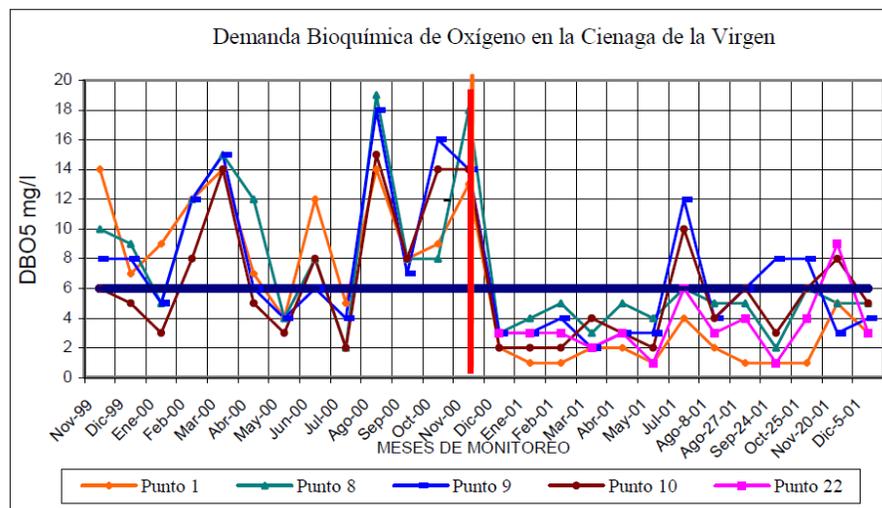


Figura 25. Comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la Ciénaga de la Virgen entre Agosto 1999 y Septiembre 2002.

Fuente: (Beltrán, 2003)

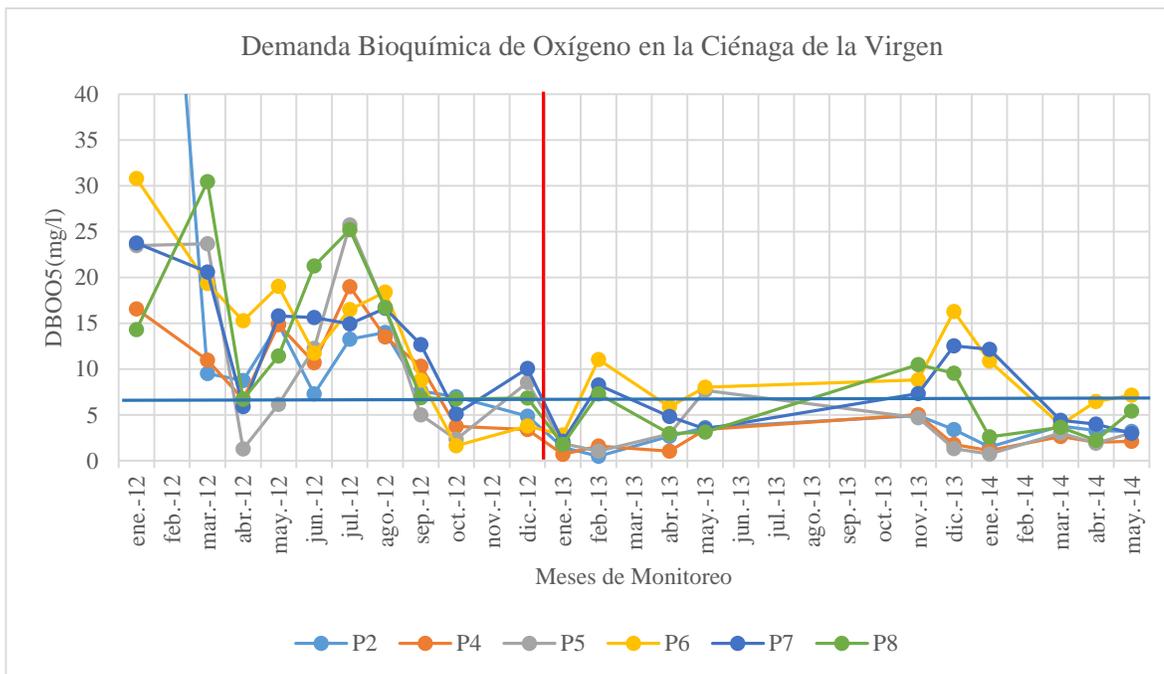


Figura 26. Comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la Ciénaga de la Virgen entre Enero 2012 y Mayo 2014.

Fuente: Autores

Con la implementación de la Bocana durante la época de sequía siguiente a su inicio de operación, los valores de DBO5 se mantuvieron por debajo de 6 mg/l pasando de valores máximos antes de su operación hasta de 18 mg/l. A partir de julio de 2001 puntos como el 9 y 10 alcanzaron valores hasta 8 y 12 mg/l. Pero dicho efecto para el año 2012 no se manifiesta ya que se presenta un valor crítico en enero de 2012 para el punto P2 con 110 mg/l y sus valores sin tener este en cuenta llegaban hasta 30 mg/l con un promedio de 14 mg/l, muy por encima de la meta. Así, con la implementación del Emisario Submarino puntos como P2, P4 y P5 se mantienen por debajo de 6 mg/l, pero puntos como P6 muestran un máximo en diciembre de 2013 de 16 mg/l, y en la época del invierno del 2013 P7 llega hasta 12 mg/l.

Entonces, haciendo un análisis de lo anterior se puede mencionar que lo más seguro es que haya aumentado el aporte de carga orgánica entre el período Bocana y Emisario Submarino, y que a su vez la Bocana por sí sola se hace insuficientemente capaz de asimilarla en su



totalidad. Lo anterior, se evidencia sobre todo en las épocas de sequía como la de 2012. Para lo cual la implementación del Emisario Submarino, ayuda al cuerpo de agua a disminuir los niveles de DBO5 independientemente si la época es de sequía o lluvia.

6.3.6 Verificación del cumplimiento de los Objetivos trazados al inicio del Proyecto Emisario Submarino

A partir de la superposición de mapas generados con la modelación matemática suministrada por ACUACAR, teniendo en cuenta el índice de calidad ICA, se obtuvo un nuevo mapa (Ver Figura 23) que permitió comparar los resultados obtenidos luego de la implementación del Emisario Submarino (Figura 19) con lo esperado por ACUACAR.

La modelación realizada por la firma holandesa Haskoning, consideró una serie de escenarios diferenciados por el caudal de descargue de aguas residuales en uno o varios sitios de vertimiento, para los años 2005 y 2025. Ahora bien, como no se obtuvo una diferencia significativa en cuanto a los resultados obtenidos para cada uno de los años, por lo menos en el escenario 7, se decidió comparar con el período de tiempo más cercano (año 2005); y en tiempo de sequía ya que se simula mayor concentración de sustancias por menor caudal.

De este modo, resultó que de acuerdo con la modelación el valor mínimo que definía la calidad del agua de la Ciénaga era de 64.98, el cual fue superado al obtenido luego de la construcción del Emisario Submarino, que fue de 69. Con ello se demuestra que actualmente el estuario está más cerca de pertenecer completamente a la categoría Buena y dejar la Media. Sin embargo; no sucede lo mismo con el máximo valor de ICA. Según la modelación, gran parte del cuerpo de agua se encuentra cercana a un índice de 94.91, es decir dentro de la categoría Excelente, pero el máximo valor alcanzado luego de la construcción del Emisario fue de 86, el cual se encuentra dentro de la categoría Buena. Esto representa sin duda un avance significativo, pero a su vez indica que se debe continuar con los monitoreos para registrar lo sucedido en el cuerpo de agua.

Por otra parte, según la Figura 27, la zona con mejor calidad de agua de la Ciénaga se encuentra hacia el Norte. Esto puede ser, debido a que en la modelación realizada se



encontraron valores en la Zona Sur, entre rangos de 25000 - 30000 para coliformes Totales, y 10000 - 15000 para coliformes Fecales, y este último es el segundo parámetro de mayor importancia dentro del índice ICA.

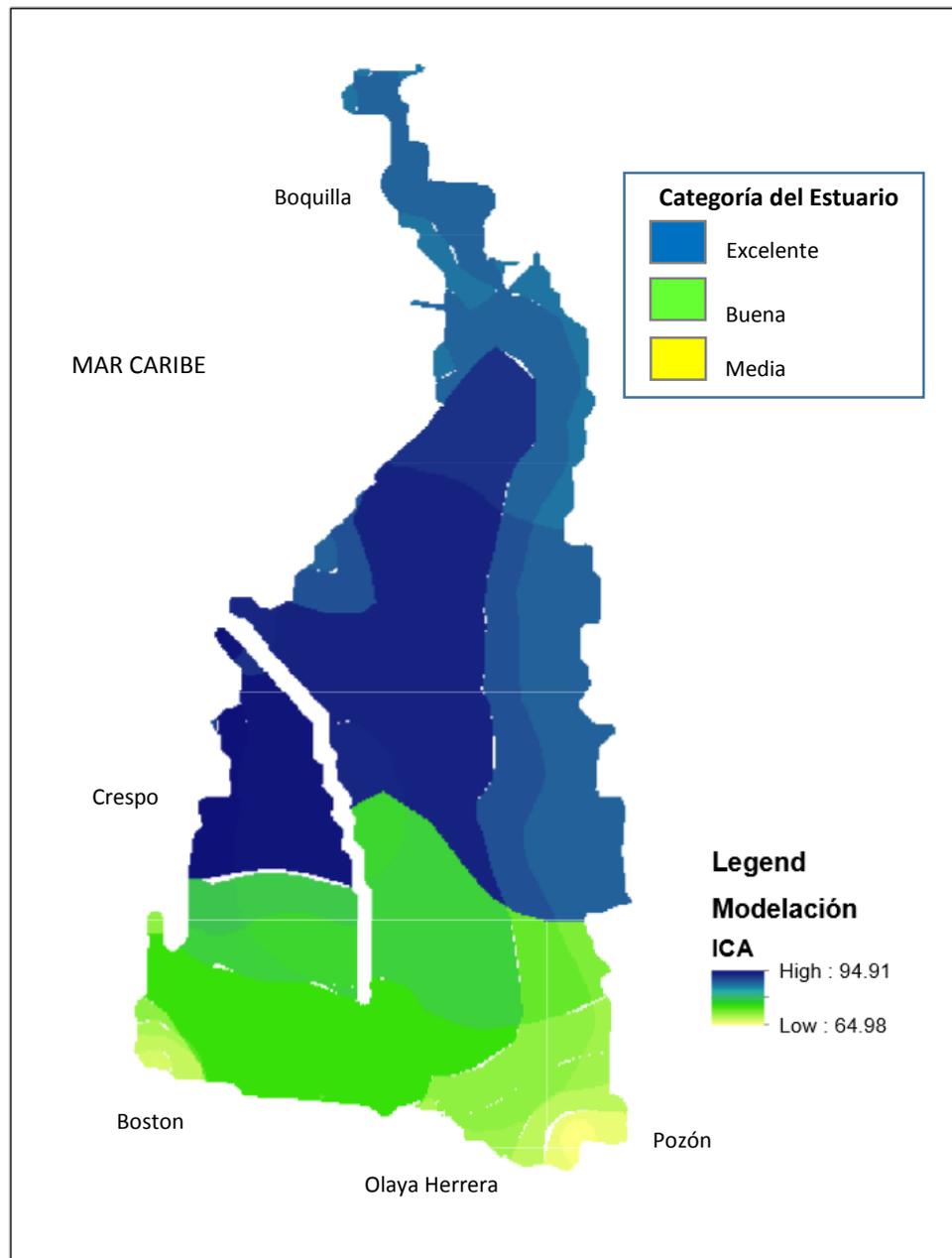


Figura 27. Conversión de Mapa de Modelación de ACUACAR de la Ciénaga de la Virgen en la ciudad de Cartagena, en índice de calidad ICA

Fuente: Autores



7. CONCLUSIONES

Luego de comparar cada uno de los parámetros físico-químicos y microbiológicos que se han medido entre el período 1999 – 2014 en la Ciénaga de la Virgen, empleando el índice de calidad del agua ICA, con el fin de verificar que se han cumplido a cabalidad los objetivos trazados al inicio del proyecto Emisario Submarino, y siguiendo la metodología propuesta al inicio del proyecto se concluyó lo siguiente:

- ✓ Antes de la construcción de la Bocana Estabilizada de Mareas, la calidad del agua de la Ciénaga en promedio era Media (con valores de ICA entre 46.8 y 75.6), con excepción de puntos como P2 y P6 con condiciones Malas debido a descargas directas de aguas residuales de las redes 7 de Agosto y colectores de barrios como Ternera y Blas de Lezo.
- ✓ Entre el período de la Bocana y el Emisario en promedio se obtuvo una calidad Media, presentándose mejores condiciones en la Zona Norte que en la Zona Sur. Para la primera los porcentajes de categorías Media y Buena fueron iguales, y tan sólo un 3% de los datos fueron categoría Mala; mientras que en la segunda se obtuvo un 13% para esta categoría. Las peores condiciones se dieron en el año 2006, donde se presentaron condiciones de Mala calidad en el 77% de los puntos estudiados.
- ✓ Con la implementación del Emisario se evidencia un cambio significativo, debido a que la totalidad de los puntos alcanzan condiciones de Buena calidad y tan sólo P28 se mantiene en Media, aunque con valores de ICA superiores a 60.
- ✓ Los resultados de ICA obtenidos para la Zona Norte de la Ciénaga, muestran que en dos de los tres períodos discriminados, más del 50% de los índices obtenidos corresponden a calidad Buena, donde tan sólo un 3% está en categoría Mala para el período comprendido entre la Bocana y el Emisario. Algo diferente sucede en la Zona Sur donde prima la categoría Media en los dos primeros períodos, y el porcentaje de Mala (10% para antes de Bocana y 13% entre Bocana y Emisario) es alto comparado con el de la



Zona Norte. No obstante; luego del Emisario el comportamiento es similar al de la zona Norte con frecuencias de calidad Buena mayores considerablemente a la de Media.

- ✓ Suponiendo que la Ciénaga puede ser evaluada como agua marina por su porcentaje de salinidad superior a 30, se tiene con la implementación del Emisario Submarino a pesar de que aumenta la presencia de condición Adecuada a un 60%, disminuye la Óptima a 8% y aumenta la Aceptable e Inadecuada en un 25% y 7% con respecto a antes de su operación. Lo anterior, pone en duda las condiciones de propagación de vida acuática en el estuario, debido a que puntos en la Zona Sur que habían tenido mejoras como P2, P4 y P7, para el 2014 bajan su calidad a Media, aunque otros ubicados en la Zona Norte como E3, P10 y P28 arrojan gratos resultados con condiciones Adecuadas y Óptimas.
- ✓ Con respecto a cada punto estudiado, se obtuvo que los puntos con mayores varianzas en su comportamiento fueron los de la Zona Sur (P2, P4, P5, P6, P7 y P8), los cuales pasaron de categorías Mala y Media a obtener frecuencias del 100% en el rango de Buena, lo que permite suponer el impacto significativo que ha representado la construcción y operación del Emisario Submarino, y la importancia de continuar con los monitoreos para comprobar futuras mejoras de todas las zonas del estuario, ya que no han llegado a la categoría Excelente.
- ✓ De acuerdo con el Decreto colombiano 1594 de 1984 el uso que puede darse a la Ciénaga en el 2014 es Contacto Primario, esto tanto para coliformes Fecales como Totales. Sin embargo; para éste último el punto E1 indica Contacto Secundario, sobrepasando los límites para coliformes fecales. Es por esto que se debería continuar con el seguimiento.
- ✓ Tanto para Coliformes Fecales como Totales, la zona Sur de la Ciénaga siempre presentó los mayores valores a lo largo de los años. Esto evidencia que es la zona más afectada, a razón de que recibía directamente los vertimientos de aguas residuales del alcantarillado de la ciudad y a su vez el agua lluvia que recogían cada uno de los canales



en la zona urbana, además de los arroyos existentes en la zona rural y los vertimientos informales que aún se presentan.

- ✓ Con respecto a los valores permisibles establecidos para los otros parámetros mencionados en el Decreto 1594 de 1984, se tuvo un total cumplimiento para cada uno de los puntos estudiados, excepto para el Oxígeno Disuelto, donde todos los puntos superan el límite fijado para preservación de Flora y Fauna.
- ✓ De acuerdo con la modelación matemática realizada, el valor mínimo que definía la calidad del agua de la Ciénaga era de 64.98, inferior al obtenido luego de la construcción del Emisario Submarino, que fue de 69. Lo que supone que actualmente el estuario está más cerca de pertenecer completamente a la categoría Buena. Por otra parte, el máximo valor de ICA era de 94.91, es decir dentro de la categoría Excelente, pero el máximo valor alcanzado luego de la construcción del Emisario fue de 86, es decir perteneciente a la categoría Buena.
- ✓ No se ha alcanzado a cabalidad la meta propuesta con el proyecto Emisario Submarino debido a que se pretendía alcanzar valores de calidad Excelente para el mismo año de inicio de operación del Emisario y ya ha transcurrido un año y nueve meses y se obtiene categoría Buena.
- ✓ A partir del análisis tendencial se puede inferir que la Ciénaga seguirá mejorando su calidad debido al intercambio de flujo que le brinda la Bocana Estabilizada de Mareas con el agua de mar que tiene mayor capacidad de autopurificación, pero esto puede tardar debido a los vertimientos informales en la zona sur de la Ciénaga o en la norte por parte de nuevas invasiones y por las descargas de caños que recogen el agua de escorrentía en la ciudad de Cartagena y corregimientos aledaños a la misma.



8. RECOMENDACIONES

A pesar que hasta el momento se ha obtenido un cambio significativo en las condiciones de calidad de agua de la Ciénaga de la Virgen, con respecto a lo registrado desde 1999, los autores consideran que es importante continuar con los monitoreos para verificar si más adelante se alcanza la calidad Excelente deseada con el proyecto Emisario Submarino, para garantizar el buen uso del estuario sin que represente algún peligro para los ciudadanos y turistas. Para continuar con la metodología planteada en el presente trabajo donde se determina la calidad del agua a partir del cálculo del índice ICA, es necesario que próximos estudios consideren la medición de parámetros como la turbiedad y el nitrato, los cuales no se registraron históricamente por las entidades EPA y ACUACAR.

Cabe mencionar que entre las limitaciones más importantes que se presentaron en el análisis de los datos estudiados, fue que no se dispuso de información acerca de balances hídricos de la Ciénaga de la Virgen. Lo anterior por falta de toma de mediciones de caudales en los canales de entrada y salida de la misma.

Por otra parte, resulta necesario elaborar propuestas que brinden solución a los problemas de alcantarillado que actualmente se presentan en algunas viviendas o barrios ubicados en los alrededores de la Zona Sur de la Ciénaga, y que representan el 10% de vertimientos de aguas residuales que llegaban a la misma antes de la implementación del Emisario.

A su vez, los autores plantean como solución a la mejora de la calidad del agua hasta categoría Excelente, que se aceleren procesos de autopurificación del estuario a partir de la agilización en el intercambio de agua con el Mar Caribe o en su defecto la ampliación de la Bocana o el continuo funcionamiento de la misma y tratar de analizar las posibles mejoras que conllevaría abrir la boca natural que permanece cerrada en la actualidad en la zona Norte de la Ciénaga. Como también una posible determinación de la calidad del agua en tiempo real en la página web de ACUACAR o el EPA para alertar a los residentes y turistas si es posible el uso de contacto primario con mayor certeza dependiendo las condiciones del día.



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACUACAR, A. (2002). *Memoria Técnica Modelación Bidimensional Ciénaga de la Virgen*. Cartagena: Haskoning/Carinsa.
- Aguas de Cartagena S.A. (2002). *Informe Final Modelación Ciénaga de la Virgen, Cartagena*. Cartagena.
- Alcaldía de Cartagena. (15 de Septiembre de 2013). *Distrito invierte 3.300 millones en mantenimiento de canales*. Recuperado el 28 de Enero de 2015, de <http://www.cartagena.gov.co/Cartagena/prensa/default.asp?codigo=7698&tipo=Comunicados>
- Baird, C. (2004). *Química Ambiental*. Barcelona: Reverté S.A.
- Banco Internacional de Reconstrucción y Desarrollo (BIRD). (22 de Abril de 2004). *Respuesta de la Administración del Banco a la solicitud de Someter al Examen del Panel de Inspección el Proyecto de Abastecimiento de Agua, Alcantarillado y Ordenación Ambiental de Cartagena Colombia*. Obtenido de <http://siteresources.worldbank.org/EXTINSPECTIONPANEL/Resources/CartagenaManagmtResponseSPANISH.pdf>
- Bayram, A., Önsoy, H., Numan Bulut, V., & Akinci, G. (2012). *Influences of urban wastewaters on the stream water quality: a case study from Gumushane Province, Turkey*. Gumushane, Turkey: EBSCO HOST.
- Beltrán, P. (2003). Bocana Estabilizada de Marea como Proceso Aeróbico de Autodepuración en la Ciénaga de la Virgen. *Universidad del Valle/Instituto Cinara*, 59-64.
- Blanco Santamaria, A. (20 de Noviembre de 2014). Funcionario del EPA Cartagena. (N. Serje, Entrevistador)
- CARDIQUE, & Conservación Internacional Colombia. (2004). *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de la Ciénaga de la Virgen*. Cartagena de Indias. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/7096498/01-Plan-to-y-Manejo-Cuenca-Cienaga-de-La-Virgen>



- Cartagena Cómo Vamos. (2008). *Evaluación Ciudadana a la Calidad de Vida en Cartagena*. Cartagena.
- Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas (Cimab). (2010). *Análisis de Línea Base sobre el Manejo de las Aguas Residuales Domésticas en la Región del Gran Caribe*. La Habana.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2000). *Historia y Aplicación de Normas Microbiológicas de Calidad de Agua en el Medio Marino*.
- Comunicaciones ACUACAR. (2013). *Positivo resultado ambiental para Emisario Submarino*. Cartagena. Obtenido de <https://www.acuacar.com/Noticias/tabid/91/ArticleID/202/Positivo-resultado-ambiental-para-Emisario-Submarino.aspx>
- Contraloría Distrital, d. C. (Diciembre de 2011). *Informe sobre el estado de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente*. Obtenido de http://contraloriadecartagena.gov.co/ar/pdf/InformedeAuditoria_11/Informe%20Macro%20Ambiental_2008-2011.pdf
- El Universal. (13 de Abril de 2013). La Bocana abre sus puertas a los cartageneros. *El Universal*.
- El Universal. (28 de Abril de 2013). *La Ciénaga de la Virgen: Potencial virgen*. Obtenido de El Universal: <http://www.eluniversal.com.co/suplementos/dominical/la-cienaga-de-la-virgen-potencial-virgen-117589>
- El Universal. (29 de Octubre de 2014). *Estudio piloto para recuperar la Ciénaga de La Virgen*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2014, de <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/estudio-piloto-para-recuperar-la-cienaga-de-la-virgen-175353>
- Eljaiek Urzola, M. (2012). *El Saneamiento Ambiental y Contaminación del Agua*. Cartagena: Monica Eljaiek.
- ESRI España. (2010). *ESRI España*. Recuperado el 03 de Septiembre de 2014, de <http://www.esri.es/es/>



- Establecimiento Público Ambiental (EPA). (s.f.). *Resumen de monitoreos históricos - Ciénaga de la Virgen*. Cartagena.
- Fajardo, S. L. (2010). *Protocolo para Toma de Muestras de Aguas Residuales*. Amazonas: CorpoAmazonía.
- Gómez, F. S. (2003). *Consideraciones Técnicas del Emisario Submarino de Cartagena*. Cartagena: INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras).
- Google Maps. (2014). *Google Maps*. Obtenido de <https://maps.google.es/>
- Health Canada. (2012). *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality*. Canada. Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/water-eau/2012-sum_guide-res_recom/2012-sum_guide-res_recom-eng.pdf
- Holguin-Gonzales, J., Everaert, G., Boets, P., Galvis, A., & Goethals, P. (2013). *Development and application of an integrated ecological modeling framework to analyze the impact of waste water discharges on the ecological water quality of rivers*. Cali: SciVerse ScienceDirect.
- IDEAM CIH, C. (2007). *Informe Final Contrato 111*. Obtenido de <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/020735/Informe%20Final/INFORME%20FINAL%20IDEAM.pdf>
- Ingeniería y Tecnología al Servicio de Colombia (INGTEC). (Agosto de 2012). *Sistema de Información Geográfica (SIG)*. Obtenido de http://ingteccolombia.com/?page_id=128
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” - INVEMAR. (Agosto de 2012). *Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia: Año 2011*. Obtenido de http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/IER_2011.pdf
- Instruments, S. (2014). *European Union (Drinking Water) Regulations*. Dublin. Obtenido de <http://www.irishstatutebook.ie/pdf/2014/en.si.2014.0122.pdf>
- INVEMAR. (2011). *Ficha Técnica Indicador Regional – Calidad del Agua*. Obtenido de http://siam.invemar.org.co/indicadores/atlas_ier_icam.jsp



- INVEMAR. (2012). *Sistema de Indicadores de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia* - SISCAM. Obtenido de <http://www.invemar.org.co/noticias.jsp?id=4338&idcat=105>
- Lillo, J. (10 de Enero de 2007). *Técnicas Hidrogeoquímicas*. Obtenido de http://www.escet.urjc.es/~jlillo/Tecnicas_Hidrogeoquimicas.pdf
- Maldonado, W., Baldiris, I., & Díaz, J. (2011). Evaluación de la calidad del agua en la Ciénaga de la Virgen (Cartagena, Colombia) durante el período 2006 - 2010. (Dialnet, Ed.) *Guillermo de Ockham - Ciencias exactas y aplicadas*, 79-87.
- Martínez, E., & Arrieta, A. (2007). Análisis espectral de corrientes en la Bocana de Marea Estabilizada de la Ciénaga de la Virgen de la ciudad de Cartagena. En I. Restrepo, L. D. Sánchez, A. Galvis, J. Rojas, & I. J. Sanabria, *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio* (págs. 97-105). Cali: Universidad del Valle.
- Meza, M. (2014 de agosto de 2014). *Residuos amenazan proyecto de La Bocana*. Recuperado el 29 de enero de 2015, de El Universal: <http://m.eluniversal.com.co/cartagena/residuos-amenazan-proyecto-de-la-bocana-167031>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Resolución Número () - Decreto 3930 de 2010*. Cartagena.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. (1984). *Decreto 1594 de 1984*. Cartagena.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Resolución 2115 de 2007*. Cartagena.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Decreto 3930 de 2010*. Cartagena.
- Ministerio de Educación Nacional. (s.f.). *¿Qué es un SIG?* Obtenido de <http://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190793.html>
- Ministerio de la Protección Social. (2007). *Decreto 1575 de 2007*. Cartagena.
- Mouthon Bello, J. (1988). *Modelación Hidrológico y Ambiental de la Ciénaga de la Virgen*. Bogotá: Maestría Uniandes.



- Oficina Comercial de Ecuador en Ankara. (2013). *Guía Comercial de Turquía*. Obtenido de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/07/PROEC_GC2013_TURQUIA.pdf
- Orellana, L. (Marzo de 2001). *Estadística Descriptiva*. Obtenido de http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/modulo%20descriptiva.pdf
- Parra, J. (14 de Octubre de 2014). *Falta de conciencia ciudadana tiene al sector La Bocana lleno de basuras*. Recuperado el 28 de Enero de 2015, de El Universal : <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/falta-de-conciencia-ciudadana-tiene-al-sector-la-bocana-lleeno-de-basuras-174012>
- Paternina, J. C. (04 de Septiembre de 2014). Coordinar Operativo en el EPA. (N. Serje, & D. Arenas, Entrevistadores)
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Alcaldía de Cartagena de Indias, Establecimiento Público Ambiental - EPA Cartagena, Observatorio del Caribe Colombiano. (2009). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Cartagena*. Cartagena.
- Reolon, L. (Octubre de 2010). *Programa de Formación Iberoamericano en materia de aguas*. Recuperado el 20 de Noviembre de 2014, de Indices de Calidad de Agua: <http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20CALIDAD%20DE%20LAS%20AGUAS/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS/PONENTES/Tema%203%20GRH%20Uruguay%20A%20Guarani/INDICES%20DE%20CALIDAD%20DEL%20AGUA%20SUPERFICIAL.pdf>
- Ríos, E., Palacio, J., & Aguirre, N. (2008). Variabilidad fisicoquímica del agua en la ciénaga El Eneal, reserva natural Sanguaré municipio de San Onofre-Sucre, Colombia. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 39-45.
- Romero Rojas, J. A. (2005). *Calidad del Agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sámano Celorio, M. (8 de Septiembre de 2011). *Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad del agua en un Sistema de Información Geográfica*. Obtenido de Tesis Doctorales en Red (TDR): <http://bucserver01.unican.es/xmlui/handle/10902/1297>



- Sistema de Información Ambiental Marina - SIAM. (3 de Septiembre de 2014). *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés"*. Obtenido de SISTEMA DE INFORMACIÓN DE LA RED DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD AMBIENTAL MARINA DE COLOMBIA (REDCAM): http://siam.invemar.org.co/siam/redcam/indicadores/index_2.jsp
- Tambekar, P., Morey, P., Batra, R., & Weginwar, R. (2013). Physico-chemical parameter evaluation of water quality around Chandrapur District Maharastra, India. (EBSCO HOST, Ed.) *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 27-36.
- Tirado, O., Manjarrez, G., & Díaz, C. (2011). Caracterización Ambiental de la Ciénaga de La Quinta localizada en Cartagena de Indias, Colombia, 2009 - 2010. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 131 - 139.
- Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (2009). *DISEÑO DEL PROGRAMA DE SEGUIMIENTO AMBIENTAL PERMANENTE DEL ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES EN VARIAS ÁREAS PORTUARIAS DEL PAÍS*. Medellín.
- Wikipedia. (12 de Octubre de 2014). *Temporada invernal en Colombia de 2010 y 2011*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2014, de http://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_invernal_en_Colombia_de_2010_y_2011#En_Bol.C3.ADvar
- Yael Bohn, V., Perillo, G., & Píccolo, M. (2004). Calidad y Aprovechamiento del Agua de la Laguna Unamuno (Buenos Aires, Argentina). (Dialnet, Ed.) *Papeles de Geografía*, 173-184.



10. ANEXOS

Anexos 1. Simulación ACUACAR Febrero 2005 para Escenario 7: Descarga es 10% de la descarga total.

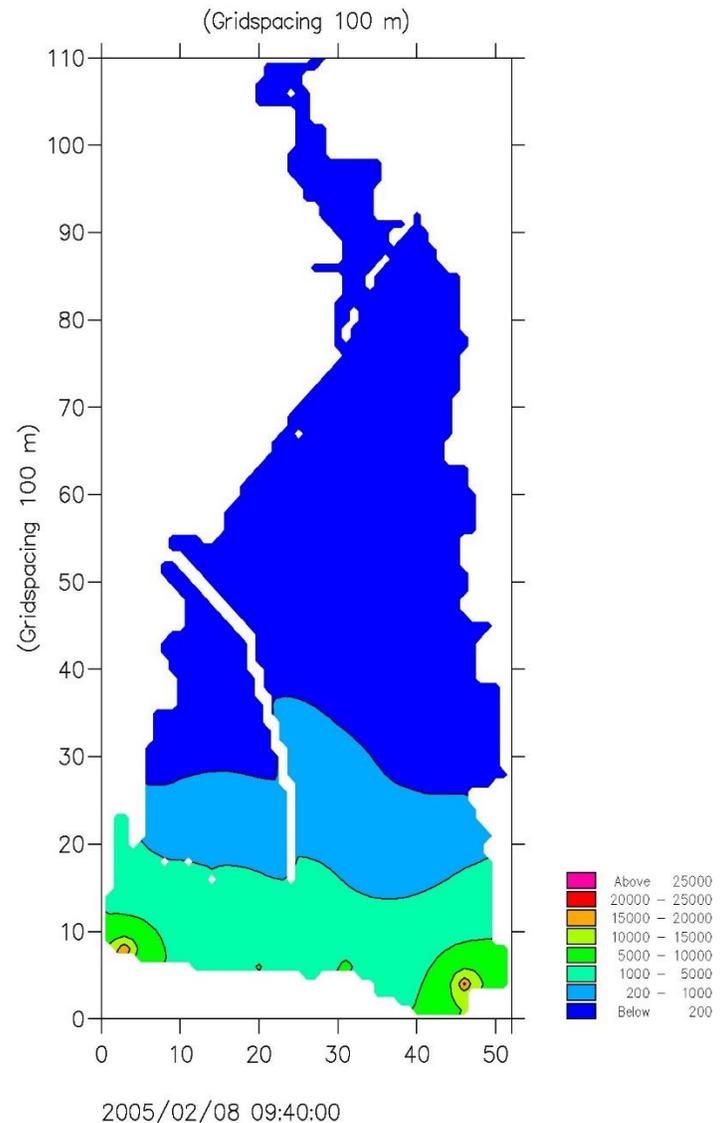
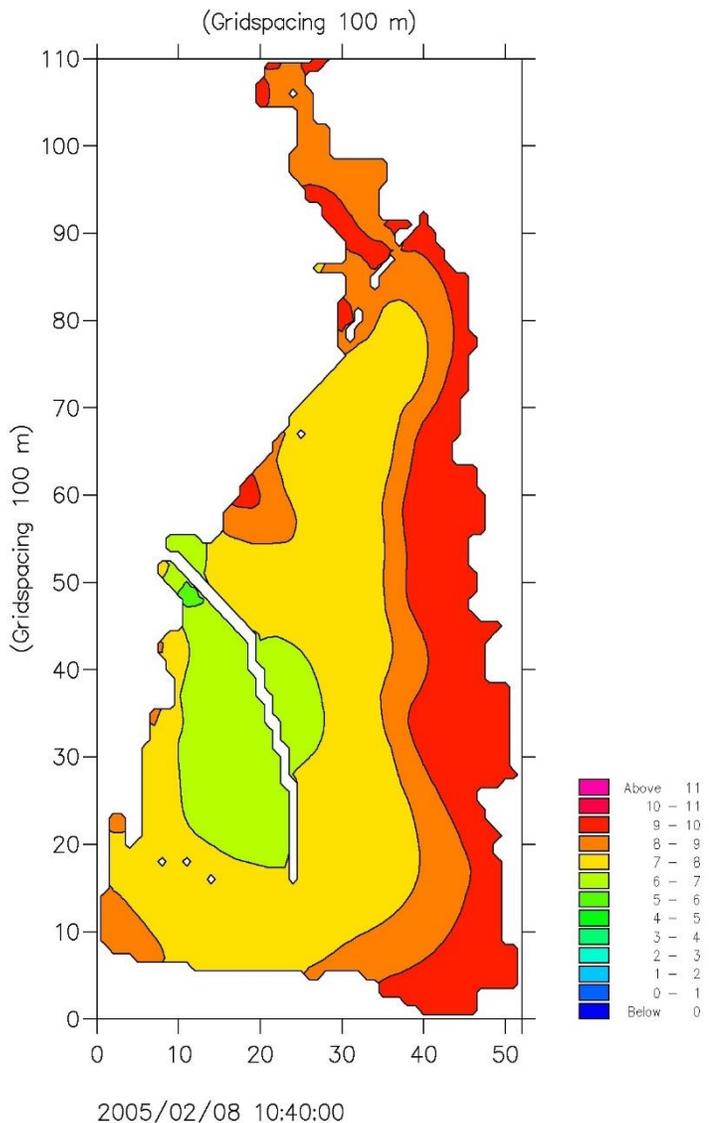


Figura 28. Escenario 7: Simulación Oxígeno Disuelto febrero 2005 (NMP/100 ml). Descarga es 10% de la descarga total

Fuente. (ACUACAR, 2002)

Figura 29. Escenario 7: Simulación Coliformes Fecales febrero 2005 (NMP/100 ml) Descarga es 10% de la descarga total

Fuente. (ACUACAR, 2002)

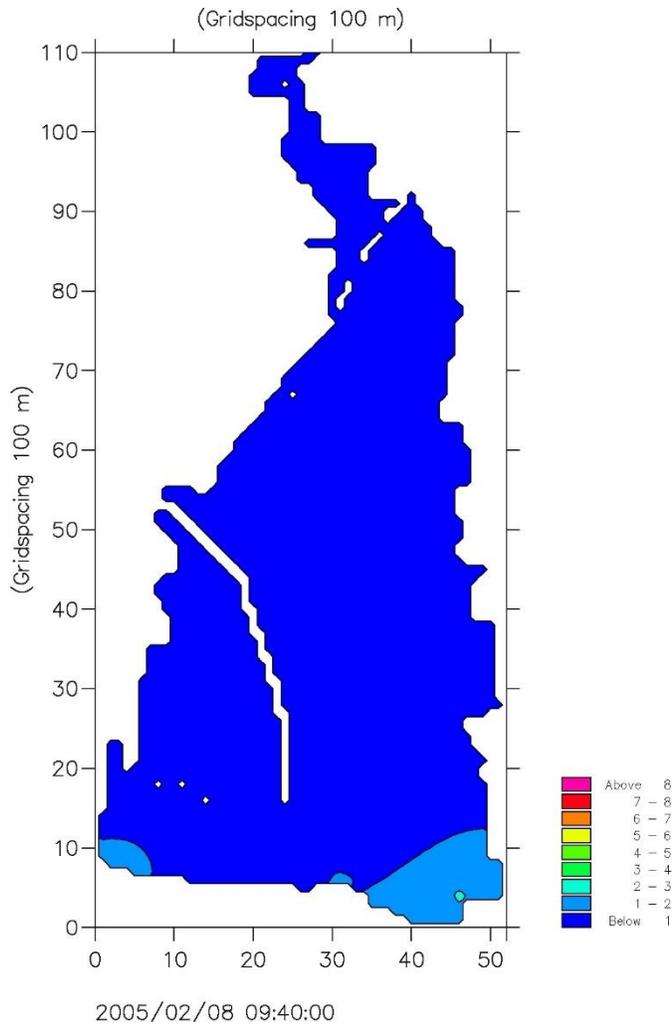


Figura 30. Escenario 7: Simulación DBO disuelto febrero 2005 (mg/L) Descarga es 10% de la descarga total
Fuente. (ACUACAR, 2002)

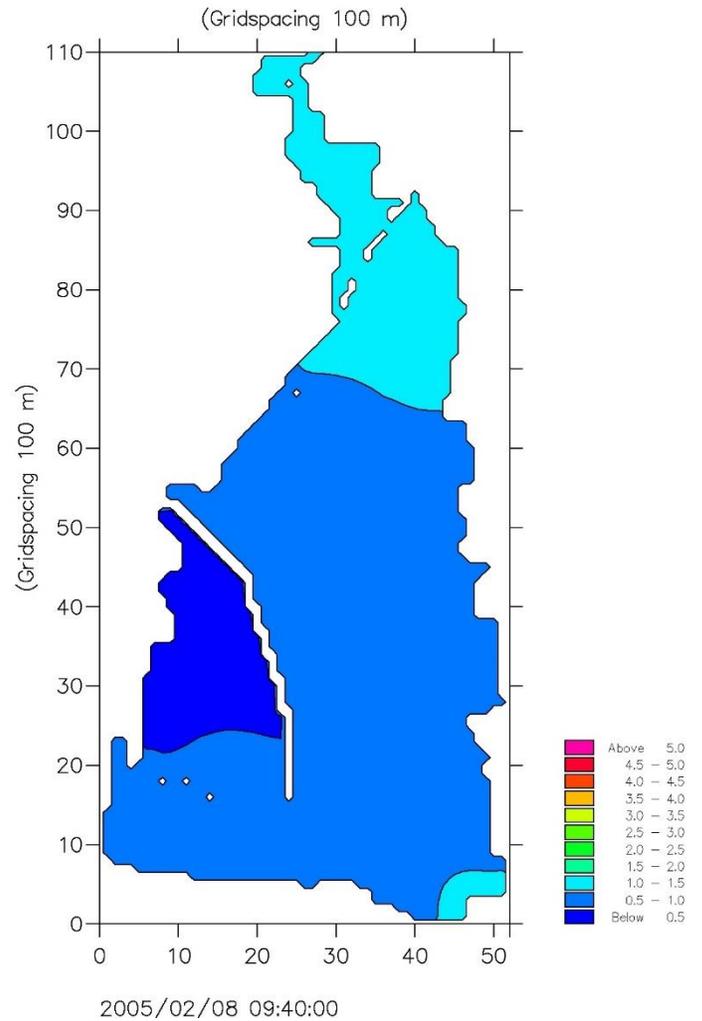


Figura 31. Escenario 7: Simulación DBO en suspensión febrero 2005 (mg/L) Descarga es 10% de la descarga total
Fuente. (ACUACAR, 2002)

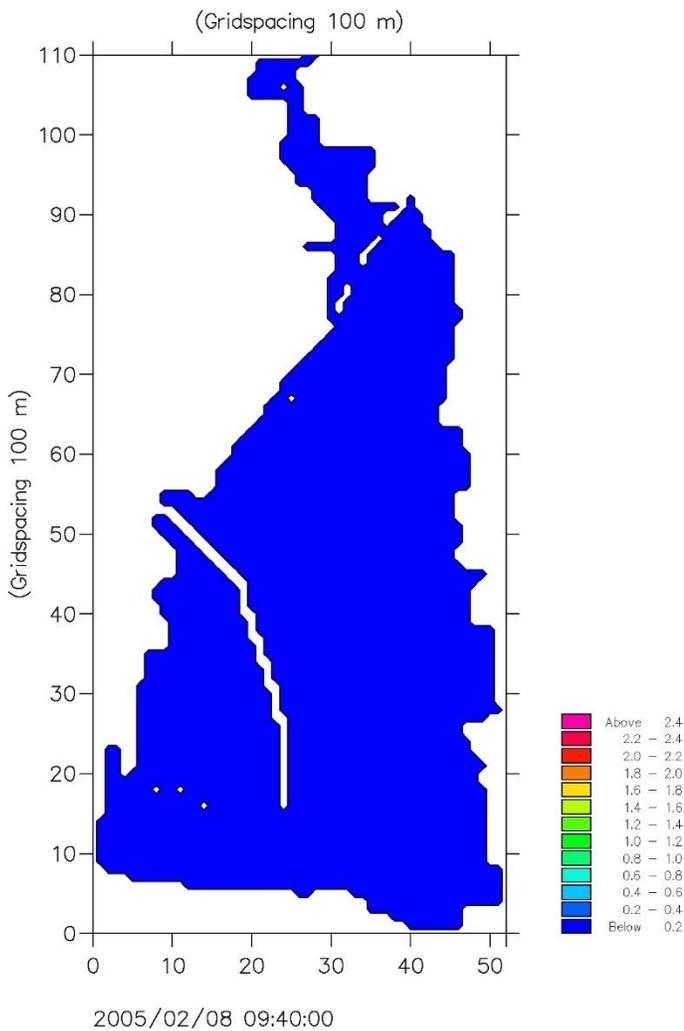


Figura 32. Escenario 7: Simulación Nitrato febrero 2005 (mg/L)
Descarga es 10% de la descarga total
Fuente. (ACUACAR, 2002)

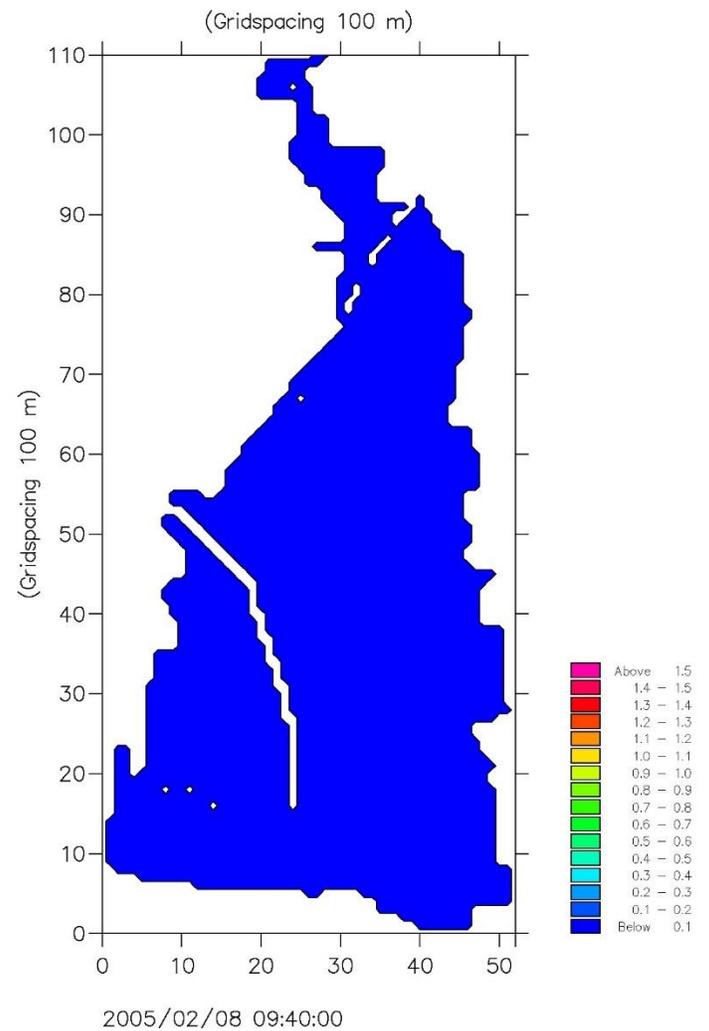


Figura 33. Escenario 7: Simulación Fosfato febrero 2005 (mg/L)
Descarga es 10% de la descarga total
Fuente. (ACUACAR, 2002)