

ANÁLISIS DE LA CALIDAD HÍDRICA EN LA ZONA NERÍTICA SUPERFICIAL DE
SAN ANDRÉS ISLA.

CAMILO ANDRÉS DURÁN MEDINA.
OSCAR JULIÁN ESTEBAN CANTILLO.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS.
BOGOTÁ D.C.
2016.

ANÁLISIS DE LA CALIDAD HÍDRICA EN LA ZONA NERÍTICA SUPERFICIAL DE
SAN ANDRÉS ISLA.

CAMILO ANDRÉS DURÁN MEDINA.
OSCAR JULIÁN ESTEBAN CANTILLO.

Solución a un problema de ingeniería.

Director: Dra. Ángela María Jaramillo Londoño.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS.
BOGOTÁ D.C.
2016.

DEDICATORIA.

Este proyecto está dedicado a San Andrés Isla y su comunidad con el fin de generar conciencia sobre la conservación y preservación de sus recursos naturales por medio de la aplicación de nuestros conocimientos en pro de salvaguardar un ecosistema tan vulnerable y de gran importancia para nuestro país.

Camilo Durán y Julián Esteban.

AGRADECIMIENTOS.

Le agradezco a Dios por ser un apoyo incondicional a lo largo de mi carrera, por ser mi compañía y guía durante esta. También por brindarme la fuerza necesaria para asumir cada prueba que se me presento a lo largo de mi formación profesional.

Le doy gracias a mi madre Martha Durán por ser una mujer emprendedora y un ejemplo a seguir que me permitió crecer como persona por medio de los valores que me ha inculcado a lo largo de mi vida. De igual forma le agradezco a mi Nana Tais Benítez por ser mi segunda madre y darme la oportunidad de aprender de ella.

A Juli por haber sido un excelente compañero de tesis y amigo, por haberme apoyado en cada momento y ser una constante motivación durante mi carrera para poder realizar un proyecto que fuera satisfactorio para ambos y sobre todo por brindarme un apoyo incondicional y una palabra de aliento en los momentos de debilidad y desesperación, que me demostraron una vez más el significado de una amistad verdadera.

Camilo Andrés Durán Medina.

En primera medida quiero agradecerle a Dios por su constante apoyo y ser una guía durante mi carrera universitaria, sin él no hubiera podido cumplir todas las metas que me he propuesto a lo largo de mi vida.

Gracias a mis papas Gloria y José por ser unos trabajadores incansables que siempre han querido lo mejor para sus hijos y sobre todo gracias por todos sus valores y enseñanzas que a lo largo de mi vida han sido una excelente referencia para ser la persona que actualmente soy y que con su paciencia infinita siempre han estado dispuestos a darme un consejo, un apoyo y un abrazo en los momentos de debilidad.

A mis hermanas Anya, Aleja y Caro, por ser un ejemplo a seguir y demostrarme que a pesar de las adversidades siempre se puede salir adelante por el camino de la honestidad.

A mi amigo y compañero de tesis Camilo que me brindo su amistad incondicional y compartió conmigo la calidez de su hogar, gracias por orientarme y siempre tener

una palabra de aliento en los momentos más difíciles, sin ti no hubiera sido posible hacer este proyecto y hubiera sido más difícil terminar mi carrera. Como alguna vez te lo dije tu amistad es uno de los mejores regalos que he recibido.

Julián Esteban Cantillo.

Le agradecemos de la manera más sincera a nuestra directora de tesis la Doctora Ángela María Jaramillo Londoño por brindarnos la oportunidad de desarrollar nuestro proyecto de grado bajo sus conocimientos. Por ser un apoyo incondicional en la ejecución de este y brindarnos las facilidades necesarias para iniciar, desarrollar y finalizar nuestro proyecto.

A la profesora Claudia Fernanda Navarrete y al profesor Rafael Gabriel Barragán por siempre brindarnos un espacio para resolver nuestras inquietudes con la mejor disposición posible.

A la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina por permitirnos desarrollar nuestro proyecto apoyados en la base de datos con los que cuentan y por ser una entidad comprometida con el desarrollo del mismo.

Y finalmente al Doctor Andrés Fernando Osorio Arias por compartir su experiencia y conocimientos con nosotros, siendo una guía en la ejecución del presente proyecto.

Para todos muchas gracias y que Dios los bendiga.

Camilo Durán y Julián Esteban.

CONTENIDO.

DEDICATORIA.	3
AGRADECIMIENTOS.	4
LISTA DE TABLAS.	8
LISTA DE ILUSTRACIONES.	9
LISTA DE GRÁFICAS.	10
RESUMEN.	11
INTRODUCCIÓN.	12
JUSTIFICACIÓN.	14
OBJETIVOS.	15
OBJETIVO GENERAL.	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	15
1. MARCO DE REFERENCIA.	16
1.1. ANTECEDENTES.	16
1.2. MARCO CONTEXTUAL.	18
1.3. MARCO CONCEPTUAL.	21
1.3.1. Indicadores de calidad hídrica.	21
1.3.2. Índice de Calidad de Aguas Marinas.	23
1.3.3. Métodos de análisis estadísticos para series de tiempo.	26
1.3.4. Análisis de regresión lineal múltiple.	27
1.3.5. Metodología para el análisis estadístico de un modelo de regresión lineal múltiple.	28
1.3.6. Prueba estadística t de Student.	31
1.3.7. Análisis de Componentes Principales.	31
1.3.8. Paquete estadístico IBM SPSS.	32
1.3.9. Paquete estadístico R.	33
1.3.10. ArcGis 10.2.	33
1.4. MARCO INSTITUCIONAL.	33
1.5. MARCO LEGAL.	34

2. DESARROLLO CENTRAL.	36
2.1. METODOLOGÍA.	36
2.2. RESULTADOS.	42
2.2.1. Análisis de la problemática ambiental.	42
2.2.2. Análisis de series de tiempo.	44
2.2.2. Aplicación del Índice de Calidad de Aguas Marinas (ICAM).	53
2.2.3. Ejecución del Análisis de Regresión Lineal Múltiple.	62
2.2.4. Ejecución del Análisis de Componentes Principales.	65
2.2.5. Desarrollo de escenarios futuros.	71
2.2.6. Planteamiento de soluciones ambientales.	74
3. CONCLUSIONES.	78
4. RECOMENDACIONES.	81
5. OBSERVACIONES.	82
BIBLIOGRAFÍA.	83
ANEXO 1.	89
ANEXO 2.	90

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1: Escala de valoración del índice de calidad de aguas marinas y costeras (ICAM).....	23
Tabla 2: Identificación de coeficientes adimensionales para cada una de las ecuaciones por parámetro perteneciente al ICAM.	25
Tabla 3: Tabla ANOVA.	30
Tabla 4: Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos de contacto primario, secundario y preservación de flora y fauna.	35
Tabla 5: Registro del número de datos por estación, por época y por parámetro para San Andrés Isla.	36
Tabla 6: Valores de ponderación para cada parámetro fisicoquímico o de contaminación utilizado en el ICAM.	53
Tabla 7: Índice de calidad de aguas marinas (ICAM) por estación para San Andrés Isla.....	54
Tabla 8: Coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo en San Andrés Isla.....	58
Tabla 9: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple por estación y época del año.....	63
Tabla 10: Prueba de muestras relacionadas para las variables ICAM y ARL por época.....	65
Tabla 11: Proyección de las concentraciones en relación con la población de San Andrés Islas para el año 2025 y 2030.	71
Tabla 12: Proyecciones de calidad hídrica para el año 2025 y el 2035 en cada una de las estaciones de monitoreo.....	71

LISTA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1: Mapa de la delimitación de la zona nerítica superficial para San Andrés Isla.	20
Ilustración 2: Metodología para el análisis estadístico de un modelo de regresión lineal múltiple.....	28
Ilustración 3: Vertimientos puntuales identificados en la isla.	44
Ilustración 4: Mapa de calidad hídrica para San Andrés Isla en época lluviosa.....	59
Ilustración 5: Mapa de calidad hídrica para San Andrés Isla en época seca.	60
Ilustración 6: Análisis de Componentes Principales en cuanto a la agrupación anual para San Andrés Isla.	67
Ilustración 7: Análisis de Componentes Principales en cuanto a la agrupación por época para San Andrés Isla.	68
Ilustración 8: Análisis de Componentes Principales en cuanto a la agrupación por estaciones para San Andrés Isla.	69
Ilustración 9: Escenario futuro de la calidad hídrica para época lluviosa en los años 2025 y 2035 en la zona nerítica superficial de San Andrés Isla.	72
Ilustración 10: Escenario futuro de la calidad hídrica para época seca en los años 2025 y 2035 en la zona nerítica superficial de San Andrés Isla.	73

LISTA DE GRÁFICAS.

Gráfica 1: Variación temporal de oxígeno disuelto (mg/L) en San Andrés Isla.	45
Gráfica 2: Variación temporal de pH en San Andrés Isla.	47
Gráfica 3: Variación temporal de solidos suspendidos totales (mg/L) en San Andrés Isla.	48
Gráfica 4: Variación temporal de la demanda biológica de oxigeno (mg/L) en San Andrés Isla.	50
Gráfica 5: Variación temporal de coliformes fecales (UFC/100 mL) en San Andrés Isla.	51
Gráfica 6: Variación temporal de coliformes totales (UFC/100 mL) en San Andrés Isla.	52

RESUMEN.

El estudio de la calidad del agua marino-costera es un tema de importante interés en Colombia debido a que gran parte de los vertimientos y residuos son arrojados de forma inadecuada al océano, lo cual trae consigo una serie de repercusiones que alteran el estado de los diferentes ecosistemas y los medios que se relacionan con estos. Por lo tanto y al tener en cuenta que la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA) no cuenta con un método de análisis adecuado que permita evaluar la calidad del agua en las dos épocas del año (época seca y lluviosa), el presente documento tiene como objetivo proponer una metodología de análisis del recurso hídrico oceánico, respecto a su calidad, en donde se involucre el uso del índice de calidad de agua marina en comparación con la posterior aplicación de un método de análisis estadístico de calidad hídrica basado en los parámetros físicos, químicos y biológico medidos por la corporación que permita llegar a ser un insumo y punto de partida en el diagnóstico de la calidad hídrica a partir de la generación de escenarios futuros relacionados con el aumento poblacional en pro del manejo y conservación del recurso hídrico marino-costero.

Palabras clave: calidad del agua, análisis estadístico, diagnostico, escenarios futuros, aumento poblacional.

INTRODUCCIÓN.

Debido a que San Andrés Isla no cuenta con un método de análisis de calidad de agua adecuado que permita identificar la variabilidad de la calidad del agua en la zona nerítica superficial (zona cercana a la costa que no tiene contacto con el litoral en donde hay abundancia de especies animales y tiene luz solar, permitiendo la fotosíntesis), surge la necesidad de los autores como ingenieros ambientales en formación de plantear un insumo para la toma de decisiones por parte de la autoridad ambiental competente, considerando no solo los parámetros físico-químicos y biológicos medidos por ellos, sino su relación respecto a las variaciones poblacionales proyectadas y otras condiciones cuya incidencia se relacione con los parámetros de estudio, para generar por medio de un método de análisis estadístico diferentes escenarios futuros de calidad de agua que sean el punto de partida para el correcto manejo del recurso hídrico.

En consecuencia con lo anterior, este proyecto busca proponer un método de análisis de los parámetros fisicoquímicos y biológicos recolectados por CORALINA, que facilite la creación de escenarios para el diagnóstico de la calidad del agua en la zona nerítica superficial marina de la isla y que de esta manera por medio de la validación y ajuste de los resultados obtenidos se logre generar el punto de partida necesario para que la autoridad ambiental competente pueda realizar la toma de decisiones respecto al manejo del recurso hídrico.

Por lo tanto con base en el análisis e interpretación de las series de tiempo para los parámetros físicos, químicos y biológicos de interés del presente proyecto en primera instancia se muestra la calidad hídrica promedio, como un primer diagnóstico de la zona de estudio. Seguido a esto, a partir del desarrollo de un método de análisis estadístico de regresión lineal múltiple, el lector podrá evidenciar escenarios futuros basados en las predicciones que resultan de la ejecución de este.

Para la realización de este método de análisis, los datos utilizados fueron obtenidos por medio de un convenio entre la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA) y la universidad Santo Tomás para promover la investigación con fines académicos en esta región. Los datos corresponden a unas series de tiempo para los parámetros físico-químicos y biológicos desde el año 1998 hasta el año 2015-I, con una temporalidad anual en dos épocas del año (seca y lluviosa) que corresponden a las dinámicas climatológicas de la isla.

Posteriormente las series de tiempo fueron procesadas para sintetizar la información y así lograr una mayor robustez de los datos que fuesen significantes para la ejecución del método. Esto fue posible por medio del uso de medidas de tendencia central cuya finalidad es describir las variables para verificar su relevancia al momento de ser empleadas en el cálculo del Índice de Calidad de Aguas Marinas (ICAM) y el análisis previamente nombrado.

A lo largo del documento también se observará que de acuerdo a la disponibilidad de los datos se realizaron una serie de ajustes que garantizan una fiabilidad en los resultados obtenidos y que pueden ser una herramienta inicial para posteriores estudios de análisis e investigaciones acerca de la calidad hídrica en zonas marino-costeras. Por lo tanto el orden de este documento corresponde en primera medida a los objetivos específicos, que consecutivamente pretenden desarrollar un diagnostico actual y futuro de la calidad hídrica basado en las series de tiempo y en la aplicación del índice utilizado en Colombia el cual fue adaptado por los autores para su correcto desempeño.

Los resultados obtenidos por medio de la ejecución del ICAM fueron comparados con el desarrollo de las ecuaciones de regresión lineal múltiple, que posteriormente se validaron a partir del 30% de los datos restantes por medio de la prueba estadística t de Student, con la finalidad de observar una diferencia significativa o no de ambos resultados. Seguido a esto, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con el objetivo de identificar según el factor de agrupación alguna tendencia en los datos que permita sintetizar la información necesaria para la construcción de los posibles escenarios futuros en cuanto a calidad hídrica.

Por último, los resultados obtenidos por el método de análisis estadístico de regresión lineal múltiple y la posterior aplicación de este a partir de la base de datos, permiten generar dichos escenarios que de forma gráfica y por medio del uso de la herramienta ArcGis 10.2 evidencien la variabilidad de la calidad hídrica en relación con el aumento poblacional y su efecto sobre el aumento o la disminución de las concentraciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos utilizados, para lograr así plantear de forma final una serie de acciones, métodos o herramientas que permiten la conservación y preservación de tan importante recurso en función de garantizar la calidad adecuada para su uso recreativo y de preservación de flora y fauna.

JUSTIFICACIÓN.

Debido a las características climáticas, orográficas y ecosistémicas definidas por su ubicación espacial, San Andrés Isla resulta ser un sitio de gran interés turístico y de inversión, en el cual se desarrollan diferentes actividades que han aumentado la generación de una mayor carga contaminante con posibles repercusiones sobre el medio ambiente, especialmente sobre la calidad del agua de la zona nerítica superficial. En consecuencia y debido a que San Andrés Isla en la actualidad, no cuenta con un mecanismo que permita determinar de manera eficiente la calidad del agua de la zona costera, surge la necesidad de realizar un diagnóstico de la situación, que de igual forma permita formular escenarios futuros a partir de la aplicación de un método de análisis estadístico en relación con la incidencia que puede tener la población sobre la calidad hídrica, con la finalidad de tener como resultado el punto de partida para la toma de decisiones, con respecto al manejo adecuado del recurso hídrico en el área de estudio por parte de la autoridad ambiental competente que en comparación con la normatividad legal vigente garantice los usos del agua para contacto primario y secundario por parte de la población flotante y no flotante de la isla.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- Analizar la calidad del agua a partir de parámetros físico-químicos y biológicos medidos en la zona nerítica superficial marina de San Andrés Isla con base en los datos suministrados por la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar un diagnóstico de la calidad del agua de la zona nerítica superficial de San Andrés Isla teniendo en cuenta la información de los parámetros físico-químicos y biológicos del agua tomados por CORALINA desde el año 1998 hasta el año 2015-I.
- Diseñar diferentes escenarios futuros de la calidad del agua con ayuda de un método de análisis estadístico, a partir de parámetros físico-químicos y biológicos para la zona nerítica superficial perteneciente al mar de la Isla.
- Plantear posibles soluciones ambientales que permitan el correcto manejo del recurso hídrico, con base en los diferentes escenarios resultantes del análisis estadístico realizado, como una base para la toma de decisiones.

1. MARCO DE REFERENCIA.

Por medio de un convenio realizado con la autoridad ambiental competente, CORALINA, se logró la obtención de datos los cuales son tomados por la red de monitoreo de la calidad de agua marino costera para San Andrés y Providencia en época seca y lluviosa. Estos históricos de datos fueron registrados desde el año 1998 al 2015-I para la totalidad de las estaciones que hacen parte de la red, con la finalidad de ser usados en el desarrollo académico para generar un instrumento inicial que permita la toma de decisiones respecto al uso adecuado del recurso hídrico marino con base en un modelo de calidad.

1.1. ANTECEDENTES.

Todo resultado obtenido de una medición está directamente relacionado con un error o incertidumbre asociado al muestreo de la o las variables de estudio, por lo tanto es frecuente utilizar métodos de análisis estadístico que permitan determinar la variación entre lo medido y lo observado [1]. Dentro de este análisis se utilizan las medidas de tendencia central y otros momentos estadísticos que permitan validar el ajuste de los datos al estudio específico que se desee realizar, en donde lo anteriormente descrito se convierte en el punto de partida para el desarrollo de métodos estadísticos de análisis que permitan identificar ciertos factores incidentes o predictivos para series de tiempo multivariante como el caso concreto de las variables físico-químicas y biológicas en cuanto a la calidad de un cuerpo de agua [2].

A lo largo de los años los métodos de análisis estadístico de calidad de agua se han desarrollado con énfasis en los cuerpos de agua dulce como lagos, arroyos, ríos, estuarios, entre otros, dejando de lado el análisis de la calidad hídrica en las zonas costeras pertenecientes al mar [3]. Un ejemplo de esto es un estudio realizado en las playas de Santa Mónica, Estados Unidos sobre la evaluación de cinco diferentes modelos para notificación pública del uso por contacto primario, por medio de la predicción de la calidad de agua para la cual se utilizó el método estadístico de análisis de regresión lineal múltiple como una herramienta de tipo predictivo validando el ajuste del coeficiente de determinación [4].

Por otra parte la Agencia Europea de Medio Ambiente se encarga de proporcionar datos, mapas y publicaciones sobre la calidad hídrica del mar en las zonas costeras pertenecientes a la unión europea con un énfasis especial en las aguas de uso para baño por medio de la utilización de indicadores de calidad de agua

que le permitan determinar a ellos como entidad si el uso del agua es adecuado y no presenta un riesgo para los diferentes usuarios que la frecuentan. Este monitoreo lo hacen a partir de la toma de muestras en aguas costeras e interiores para evaluar las concentraciones de distintos parámetros fisicoquímicos y en especial biológicos como la *E.coli* y los enterococos. Esto con el fin de que por medio del visor de datos WISE los usuarios puedan identificar la calidad del agua antes de dirigirse a la zona de interés [5].

Un claro ejemplo de lo anterior es el Sistema de Modelado Costero desarrollado por España, en donde uno de sus objetivos es determinar la calidad del agua en las zonas costeras del país como una herramienta de gestión respecto al uso del agua para la regeneración de playas, la calibración, creación y validación de bases de datos con el objetivo de mejorar el entendimiento costero y evaluar la calidad del agua a lo largo de las diferentes estaciones del año por medio de implementación e integración de nuevas metodologías y herramientas numéricas [6].

Así mismo, el Instituto Australiano de Ciencia Marina (AIMS) en contribución con la investigación científica mundial y con el fin de salvaguardar los ecosistemas marinos tropicales principalmente: la barrera de arrecife de coral, considerada como la más grande del mundo, promueve el desarrollo de herramientas que permitan evaluar y monitorear los efectos adversos que resultan como consecuencia de la disminución de la calidad del agua costera [7]. Esto se logra a partir de una serie de organizaciones que en trabajo conjunto permiten determinar la calidad del agua, una de estas es el Sistema Integrado de Observación Marina (IMOS) cuya función es la de monitorear por medio de la red nacional de estaciones los parámetros físicos, químicos e hidrodinámicos que resultan ser el insumo para la aplicación de las herramientas de análisis de la calidad del agua [8].

En Colombia la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, considera el uso de modelos o análisis estadísticos como una herramienta de apoyo para el monitoreo constante de este en conjunto con los sistemas de información geográfica que permitan el seguimiento de variables de calidad y cantidad [9]. A su vez el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible junto con el INVEMAR, unieron esfuerzos técnicos y financieros para la elaboración de la “Guía nacional de modelación de calidad de aguas marinas” como un instrumento para la toma de decisiones y el desarrollo de políticas que garanticen un control de la contaminación marina. Esta guía integra una serie de pasos que permiten el correcto uso de la modelación numérica en estudios de calidad del agua marina

respecto a los parámetros físicos, químicos y biológicos que un determinado contaminante sufre una vez es vertido al mar considerando las condiciones hidrodinámicas y termodinámicas que están presentes en el cuerpo de agua [10].

En cuanto al ámbito local y en especificidad con la zona de estudio, en San Andrés Isla se desarrolló como trabajo de grado el análisis histórico de la calidad de las aguas costeras por medio de índices de calidad de agua con base en los datos de monitoreo desde al año 1997 hasta el año 2005 teniendo en cuenta los parámetros de salinidad, pH, temperatura, sólidos suspendidos totales, DBO, nitrógeno, fosfatos, grasas y aceites, coliformes fecales y coliformes totales en 14 puntos alrededor de la isla [11]. Por otra parte en el año 2010 la Universidad Nacional de Colombia publicó el proyecto de grado “Elementos para un plan de gestión ambiental de las aguas costeras en San Andrés Isla”, con el objetivo de formular, a través de la construcción de mapas de calidad de agua tres escenarios donde es frecuente el uso de esta en forma recreativa, y así obtener los elementos necesarios que permitan desarrollar un plan de gestión del recurso hídrico en la zona de interés [12].

1.2. MARCO CONTEXTUAL.

San Andrés Isla forma parte del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina que se encuentra localizada a los 12°32′ norte y 81°43′ oeste. Dentro de las principales características de la isla se destaca que dentro del modelo de Reserva de Biosfera se considera que el Archipiélago es un sistema integrado con profundas relaciones entre el medio ambiente y el desarrollo económico y social. La condición de insularidad, el impacto de la ocupación territorial y la existencia de una población en condiciones de pobreza lo convierten en un sistema frágil, afectándose la disponibilidad de los recursos marino-costeros utilizados como fuente de alimentación de propios y visitantes, así como la belleza misma del paisaje, patrimonio que soporta su principal actividad económica [13].

Así mismo al ser considerada la isla de San Andrés como una de las islas oceánicas más densamente pobladas de Colombia con una población de 76.442 habitantes para el censo del año 2005 [14], se destaca que el mayor porcentaje de población se encuentra en esta y teniendo en cuenta que no es una zona industrializada, las principales fuentes contaminación son las actividades humanas entre las que se destacan las aguas servidas humanas (material orgánico biodegradable y compuestos sintéticos como detergentes y microorganismos

patógenos), residuos sólidos de la población flotante y no flotante, residuos de aceites e hidrocarburos del petróleo de las operaciones marítimas, residuos de la planta de generación eléctrica, escorrentías difusas por la presencia de fertilizantes y plaguicidas que alteran las características propias de la calidad hídrica marino-costera [15].

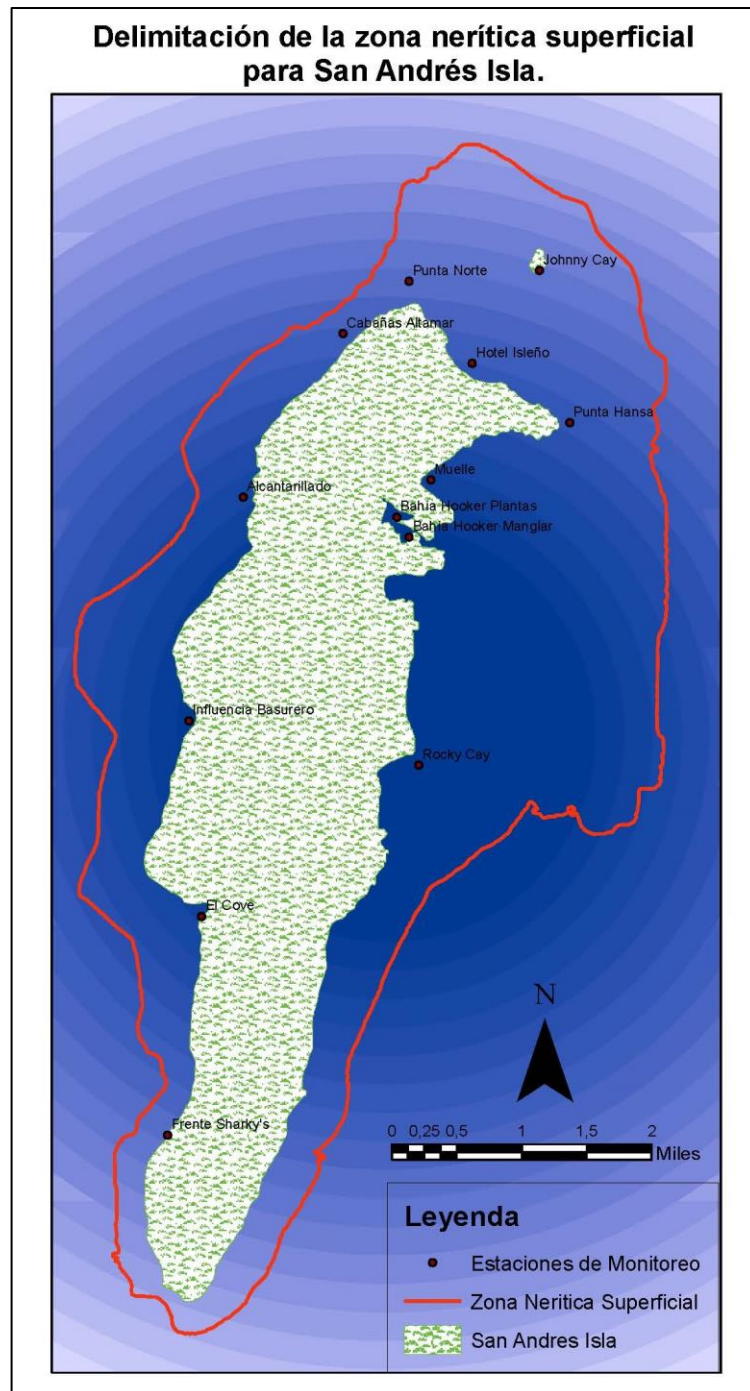
En contexto, una de las principales fuentes de contaminación de las aguas marino-costeras es el vertimiento de las aguas residuales domésticas que reciben como único tratamiento un cribado para la eliminación de sólidos gruesos en donde posteriormente son impulsadas por el emisario submarino cuya función es realizar el vertimiento de dichas aguas recolectadas por el sistema de alcantarillado, el cual no cubre la totalidad del territorio y es complementado por medio de la implementación de pozos sépticos construidos sin los requerimientos técnicos adecuados y su mantenimiento respectivo lo que contribuye a que los procesos de contaminación de las aguas marino-costeras superficiales se vean incrementados [15].

A partir de lo anterior, la zona nerítica corresponde a los primeros metros desde el inicio de la playa o bahía hasta el inicio de la zona oceánica sin contacto con el litoral marino (ilustración 1) [6], teniendo en cuenta que el alcance de este proyecto hace referencia únicamente a la parte superficial del agua y a la zona anteriormente descrita. Seguido a esto, esta delimitación se justifica debido a que las estaciones de muestreo de donde se obtienen los datos para los parámetros fisicoquímicos y biológicos se encuentran en la zona de interés para el proyecto, por lo tanto resulta de gran interés desarrollar el método de análisis en el área anteriormente descrita que es la más cercana a la población flotante y no flotante de la isla.

Otro factor de consideración para la ejecución del análisis estadístico se debe a que el archipiélago de San Andrés se caracteriza por altas temperaturas que registran un promedio anual de 27,3°C debido a su localización en la zona intertropical, en donde la influencia de los vientos alisios, que soplan del noreste, determina en parte las épocas lluviosas que comienzan en el mes de mayo, y alcanzan su máximo en los meses de octubre y noviembre prolongándose hasta diciembre; durante estos meses se registra el 80% de la lluvia anual, que en promedio es de 1700 mm. Por tal motivo las variaciones climáticas pueden tener una incidencia en los parámetros fisicoquímicos y biológicos considerados en este estudio para el cálculo de la calidad del agua marina superficial [16]. Lo que conlleva a que la ejecución del método de análisis estadístico se realice de forma

diferencial para la época seca (noviembre-abril) y para la época lluviosa (mayo-octubre).

Ilustración 1: Mapa de la delimitación de la zona nerítica superficial para San Andrés Isla.



Fuente: Autores.

1.3. MARCO CONCEPTUAL.

El recurso hídrico marino es importante no solo en términos de la biodiversidad y la protección de la vida acuática sino también para uso recreativo y de turismo, además de ser una fuente de abastecimiento de agua para las poblaciones aledañas [17]. La calidad de esta se define como la idoneidad del cuerpo de agua para asegurar que las distintas actividades de contacto primario y secundario garanticen el bienestar económico, social y ambiental de la comunidad sin generar efectos adversos significativos sobre la preservación de la flora y fauna marina [18].

Esta calidad hídrica se ve afectada cuando se logra evidenciar la entrada o presencia de una sustancia cuyas concentraciones pueden provocar efectos deteriorantes sobre el mismo, la salud humana, la biodiversidad y/o obstaculizar el desarrollo de actividades marítimas como la pesca. Por ende este proyecto toma como base teórica el Índice de calidad de aguas marinas (ICAM) propuesto por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis” en colaboración con la REDCAM y los datos suministrados por esta para la validación del índice [19].

1.3.1. Indicadores de calidad hídrica.

El uso de indicadores se basa principalmente en una expresión simple de una combinación de parámetros que puede tener un nivel de complejidad alto o medio según el interés. A partir de este concepto se derivan una serie de medidas que sirven para determinar la calidad que puede llegar a presentar cualquier tipo de ecosistema [20].

En cuanto a los índices de calidad hídrica que puede estar representados por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o un color. Este tiene como objetivo transmitir la información más fácilmente desde una lista de valores numéricos a una situación que exprese un índice de contaminación excesiva, media, o inexistente, entre otras y que de igual forma sea de fácil comprensión y abstracción [20].

Así como la aplicación de indicadores tiene beneficios, también tiene ciertas limitaciones como la de generalizar y su terminación en juicios subjetivos dado el peso de algunas de las variables, o una limitación espacio temporal que puede

generar lecturas erráticas en un lugar y en una época específica. Por ende es de vital importancia ser riguroso en la información que se está trabajando [20].

En cuanto a la clasificación de los índices de calidad de agua, el cual es el, se encuentran cuatro grupos principales [20]:

Se aplica a tensores e incluye dos categorías:

- Indicadores en la fuente: se encargan de reportar la calidad del agua, generada por tensores en fuentes discretas.
- Indicadores en un punto diferente a la fuente: reportan la calidad del agua generada por fuentes difusas.

Mide la capacidad de estrés e incluye cuatro categorías:

- Medidas simples como indicadores: incluyen una serie de atributos y componentes individuales del agua, que pueden ser utilizados como indicadores de su calidad.
- Indicadores basados en criterios o estándares: correlacionan las medidas de calidad de agua con los niveles estándar o normales que han sido determinados para la preservación y usos adecuados del agua.
- Índices multiparametro: se determinan a partir de las opiniones en conjunto o individuales de expertos.
- Índices multiparametro empíricos: se establecen por el uso de las propiedades estadísticas de las mediciones de calidad de agua.

Se basa sobre las consecuencias e incluye tres categorías:

- Indicadores de la vida acuática: se basa en la diversidad de relaciones de tolerancia de la biota acuática a varios contaminantes y condiciones.
- Indicadores del uso del agua: evalúan la compatibilidad del cuerpo de agua con usos como abastecimiento y agricultura.
- Indicadores basados en la percepción: se determinan por las opiniones del público y los usos de los cuerpos de agua.

De igual forma dichos indicadores pueden ser usados para mejorar o aumentar la información de la calidad hídrica y su difusión comunicativa sin reemplazar los medios de transmisión de la información existente [20].

Según sea el índice se contemplan seis usos principales: manejo de los recursos, clasificación de áreas, aplicación de normatividad, información pública, investigación científica y para el caso del presente proyecto el análisis de

tendencia que contempla un periodo de tiempo y representa si la calidad está disminuyendo o mejorando [20].

1.3.2. Índice de Calidad de Aguas Marinas.

El monitoreo de la calidad del agua ha surgido principalmente debido a la necesidad de verificar si las características del recurso son adecuadas para determinados usos, en donde esta es un factor limitante de los procesos biológicos que ocurren en los organismos, poblaciones y hábitats existentes en las zonas marinas y costeras, siendo un determinante clave de la salubridad y viabilidad general de las comunidades bióticas en función de las características propias del ecosistema [21].

A su vez, el monitoreo de la calidad de las aguas marinas permite la evaluación de esta por medio de la ejecución de indicadores de calidad hídrica que consideren en conjunto las características físicas, químicas y microbiológicas que describan el estado de un cuerpo de agua objeto de estudio [21]. El índice de calidad de aguas marinas (ICAM) relaciona las condiciones ambientales que propician la preservación de flora y fauna en donde su aplicación pretende mostrar de forma cuantitativa y cualitativa el estado del agua en la zona nerítica superficial como área objeto de estudio perteneciente a la Isla de San Andrés [21].

La formulación de este índice tiene una escala de cinco categorías de calidad definidas entre 0 y 100, cuyos valores se pueden observar en la tabla 1, los cuales permiten sintetizar la información de los 12 parámetros fisicoquímicos y biológicos considerados por el mismo (oxígeno disuelto, pH, nitritos y nitratos, ortofosfatos, salinidad, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días, hidrocarburos, metales pesados, coliformes fecales, coliformes totales y plaguicidas), que atienden a dos clasificaciones de las aguas marinas y costeras según su uso, ya sea para la preservación de flora y fauna y el otro para uso recreativo de contacto primario y secundario (Ecuación 1) [22].

Tabla 1: Escala de valoración del índice de calidad de aguas marinas y costeras (ICAM).

Escala de calidad.	Color.	Categorías.	Descripción.
Optima	Azul	100-90	Calidad excelente del agua.

Adecuada	Verde	90-70	Agua con buenas condiciones para la vida acuática.
Aceptable	Amarillo	70-50	Agua que conserva buenas condiciones y pocas restricciones de uso.
Inadecuada	Naranja	50-25	Agua que presenta muchas restricciones de uso.
Pésima	Rojo	25-0	Aguas con muchas restricciones que nos permiten un uso adecuado.

Fuente: Instituto de Investigación Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andreis" [21].

El indicador está conformado por dos conjuntos de variables, unas variables fisicoquímicas que describen la calidad del cuerpo hídrico basadas en las condiciones naturales del mismo y otras variables contaminantes y microbiológicas que representan las alteraciones de dicha calidad por la intervención de las actividades humanas (Ecuación 1) [22].

Ecuación 1.

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

Dónde [22]:

ICAM: valor del indicador, la ecuación arroja un numero entre 0 y 100 que califica la calidad a partir del cual y en función del uso y tipo de agua (marina o estuarina), permite estimar el nivel de calidad de la misma basada en la tabla 1.

Q_{fq} : es la cantidad de variables fisicoquímicas en función de su concentración y cuya calibración obtenida de las curvas de funcionamiento oscila entre 0 y 100.

Q_{ct} : es la cantidad de variables de contaminación en función de su concentración y cuya calibración obtenida de las curvas de funcionamiento oscila entre 0 y 100.

F_i : son los pesos específicos asignados a cada variable, y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

Para la aplicación del índice, el Protocolo Indicador realizado por el INVEMAR en conjunto con otras entidades sugiere que el cálculo de los valores índice por parámetro se haga de acuerdo a la aplicación de las ecuaciones mostradas en la tabla 2 respecto a los valores indicados para cada coeficiente.

Tabla 2: Identificación de coeficientes adimensionales para cada una de las ecuaciones por parámetro perteneciente al ICAM.

Parámetro	Ecuación	Coeficientes	
		Constante	Valor
Oxígeno Disuelto (OD)	$Y = a * x^7 + b * x^6 + c * x^5 + d * x^4 + e * x^3 + f * x^2 + g * x + h$	a	-0,00081129
		b	0,03850194
		c	-0,73888346
		d	7,28239729
		e	-38,3538401
		f	97,5295549
		g	-65,2666642
		h	3,20704575
Solidos Suspendidos Totales (SST)	$Y = a * x + b$	a	-2
		b	100
pH	$Y = a * x^{10} + b * x^9 + c * x^8 + d * x^7 + e * x^6 + f * x^5 + g * x^4 + h * x^3 + i * x^2 + j * x + k$	a	4,95643E-05
		b	-0,003155003
		c	0,084318256
		d	-1,233328391
		e	10,79194131
		f	-58,05486927
		g	190,2525828
		h	-362,8640968
		i	361,3021449
		j	-140,3742154
		k	0,007844098
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	$Y = a * x^4 + b * x^3 + c * x^2 + d * x + e$	a	0,02642913
		b	-0,8526267
		c	8,180104
		d	-12,88328
		e	1,678991
Coliformes Fecales (CFS)	$Y = a * x^8 + b * x^7 + c * x^6 + d * x^5 + e * x^4 + f * x^3 + g * x^2 + h * x + i$	a	-1,77E-28
		b	8,04E-24
		c	-1,53E-19
		d	1,6E-15
		e	-9,99E-12
		f	3,88E-08
		g	-0,0000931
		h	0,131125941
		i	5,148897451
Coliformes Totales (CTT)	$Y = a * x^6 + b * x^5 + c * x^4 + d * x^3$	a	4,63E-22
		b	-2,52E-18

	$+e * x^2 + f * x + g$	c	-1,76E-13
		d	2,46E-09
		e	-0,0000106
		f	0,02425809
		g	-0,10550888

Fuente: Instituto de Investigación Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andreis" [21].

1.3.3. Métodos de análisis estadísticos para series de tiempo.

Una serie de tiempo se define como el resultado de la observación de unos valores determinados para una variable previamente establecida a lo largo del tiempo y de forma cronológica. Dichas observaciones deben ser tomadas en intervalos regulares para lograr así determinar la variabilidad que puede tener un parámetro en el tiempo [23].

Al completar la serie de observaciones, esta se puede representar por medio de un gráfico de secuencia que relacione la observación (eje Y) con el instante en el que fue medido (eje X), en donde cada uno de los puntos se unan por segmentos que logren identificar la evolución de la variable a lo largo del tiempo. Específicamente un gráfico de secuencia permite identificar la tendencia, la estacionalidad y la heterocedasticidad de los datos, que se definen como [23]:

- **Tendencia:** componente de largo plazo que describe el crecimiento o declinación en una serie de datos en orden cronológico y que permite identificar la variabilidad de estos.
- **Estacionalidad:** supone oscilaciones a corto plazo de periodo y amplitud regular, he introduce a los comportamientos que podrían tener una predicción basada en los datos que hacen parte de la serie de tiempo.
- **Heterocedasticidad:** existencia de una varianza no constante en las observaciones tomadas para una variable y cuyo recorrido presenta una gran dispersión respecto a su propia media.

Al ser un conjunto de datos organizados cronológicamente, estos permiten ser analizados por medio de la construcción de un modelo de análisis estadístico que describa la evolución de la serie a través del tiempo, y que a su vez de forma predictiva pueda evidenciar el posible comportamiento de una o más variables con respecto a una variable dependiente en función de una o más independientes [23]. Existen distintos criterios de selección de modelos entre los cuales se mencionan: métodos de ajuste de los modelos, límites de confianza de los parámetros, coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado por los grado de libertad, error

estándar de estimación, test de falta de ajuste del modelo, diagnóstico y tratamientos de la multicolinealidad en modelos de regresión lineal múltiple y validación de las predicciones del modelo [24].

Dichos criterios permiten que el modelo seleccionado se ajuste en un gran porcentaje a la serie de tiempo que se desea analizar y por ende las posibles predicciones resultante del modelo sean confiables y verídicas.

1.3.4. Análisis de regresión lineal múltiple.

La representación de la relación entre dos o más variables a través de un modelo estadístico confiable supone que esta debe contar con una expresión lógico-matemática, que permita mostrar como es el comportamiento de dichas variables a través de predicciones de los valores que puede tomar la variable dependiente a partir de las variables independientes [25].

El análisis de regresión involucra el estudio de la relación entre dos variables cuantitativas en donde este, generalmente se interesa en determinar la asociación entre las dos variables por medio de la hipótesis de independencia estadística, la fuerza de asociación a través del coeficiente de correlación y la forma de relación para por medio de los datos generar un modelos que permita predecir el valor de una variable dependiente a partir de una o más variables independientes [25].

Cuando se habla de regresión lineal una generalización de esta es la regresión lineal múltiple que permite considerar más de una variable explicativa cuantitativa para predecir a una sola dependiente. La ecuación de dicho modelo se define de la siguiente forma [25]:

Ecuación 2.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + u$$

Dónde:

Y_i = variable dependiente del modelo.

β = coeficientes del modelo.

X = variables independientes del modelo.

u = variable aleatoria error.

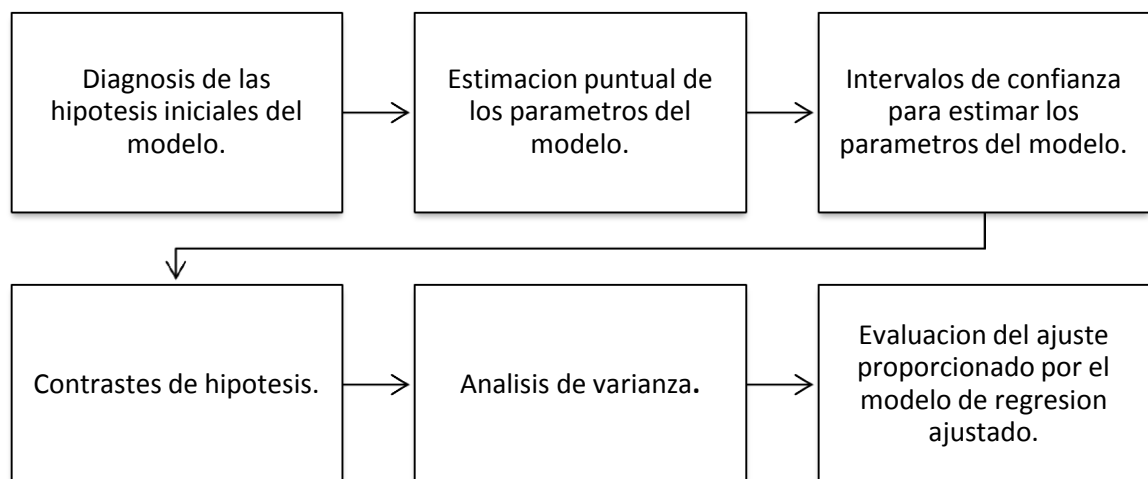
Para llegar a una toma de decisiones objetivas y racionales se necesita verificar que el modelo propuesto se ajuste a unas hipótesis determinadas por medio de herramientas estadísticas que se explican a continuación [25]:

- **Normalidad:** la observación de la variable dependiente Y_i debe tener una distribución normal.
- **Linealidad:** los valores medios de la variable respuesta dependen linealmente de los valores de las variables independientes $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ y sus respectivos coeficientes β .
- **Homogeneidad o igualdad de varianzas:** la varianza de la variable dependiente debe ser igual a la varianza de la alternativa de la hipótesis expresado como $V(Y_i) = \sigma^2$.
- **Ausencia de multicolinealidad:** no existen relaciones lineales entre las variables explicativas o independientes, lo que constituye una hipótesis que hace referencia a que una variable explicativa no es una combinación de otra dentro del modelo, y por lo tanto la distorsión del modelo se disminuye.

1.3.5. Metodología para el análisis estadístico de un modelo de regresión lineal múltiple.

Para el desarrollo del análisis estadístico de un modelo de regresión lineal múltiple que asegure un resultado confiable de las predicciones obtenidas se sigue la metodología mostrada en la ilustración 2.

Ilustración 2: Metodología para el análisis estadístico de un modelo de regresión lineal múltiple.



Fuente: Universidad Autónoma de Madrid [26].

Diagnosis de las hipótesis iniciales del modelo: se debe verificar la normalidad, linealidad, homogeneidad de varianzas y ausencia de multicolinealidad por medio del uso de un gráfico de residuos por dato y respecto a los valores pronosticados o estimados para cada variable. Este análisis visual se puede realizar por medio de gráficos como: histograma de los residuos, gráfico de probabilidades normales de los residuos y gráfico de dispersión de los residuos sobre los valores pronosticados [26].

Estimación puntual de los parámetros del modelo: por medio de la aplicación del método de máxima verosimilitud y el estimador obtenido se debe hacer la corrección en caso de ser necesaria por medio del paquete estadístico SPSS, que facilita el ajuste del modelo obteniendo la siguiente ecuación [26]:

Ecuación 3.

$$Y = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 X_1 + \cdots + \widehat{\beta}_j X_j + \cdots + \widehat{\beta}_k X_k$$

Dónde:

Y = variable dependiente del modelo.

$\widehat{\beta}$ = coeficientes del modelo ajustado.

X = variables independientes del modelo.

Intervalos de confianza: aplicando el método de la cantidad pivotal, se obtiene los intervalos de confianza que permiten al modelo de regresión lineal múltiple cuantificar de forma aproximada los pronósticos de la variable dependiente respecto a un número asignado para el coeficiente del modelo ajustado ($\widehat{\beta}$). Estos intervalos se representan de la siguiente forma [26]:

Ecuación 4.

$$IC_{1-\alpha}(\beta_j) = (\widehat{\beta}_j \pm t_{n-k-1; \frac{\alpha}{2}}(\text{error típico de } \widehat{\beta}_j))$$

Dónde:

$IC_{1-\alpha}(\beta_j)$ = intervalos de confianza para el coeficiente del modelo.

$\widehat{\beta}$ = coeficientes del modelo ajustado.

$t_{n-k-1; \frac{\alpha}{2}}$ = error típico del coeficiente del modelo ajustado.

Contrastes de hipótesis: teniendo en cuenta que la posible influencia de una variables independiente X desaparecería si su coeficiente se anulase, se plantean dos hipótesis en donde si $\beta_j = 0$ (X_j no influye) o si $\beta_j \neq 0$ (X_j si influye) que pueden ser confirmadas o descartadas por medio de la comparacion del valor 0 en el $IC_{1-\alpha}(\beta_j)$ [26].

Análisis de varianza: por medio del replanteamiento del contraste de hipótesis representado por [26]:

$$H_0: \beta_1 = \dots = \beta_k = 0 \text{ (el modelo no es conjuntamente válido)}$$

$$H_a: \text{algún } \beta_j \neq 0 \text{ (el modelo es conjuntamente válido)}$$

La confirmación de estas hipótesis se pueden realizar por medio de la técnica estadística del análisis de varianza (ANOVA) la cual consiste en la descomposición de la variabilidad en: variabilidad asociada al modelo (SCE) y la variabilidad residual (SCR) cuyos valores se sintetizan en la siguiente tabla [26]:

Tabla 3: Tabla ANOVA.

Suma de cuadrados	G.I.	Varianza	Estadístico.
$SCE = \sum_i (\hat{y}_i - \hat{y})^2$	k	$\frac{SCE}{k}$	$F = \frac{SCE/k}{SCR/(n-k-1)}$
$SCR = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2$	$n - k - 1$	$\frac{SCR}{n - k - 1}$	
$SCT = \sum_i (y_i - \hat{y})^2$	$n - 1$		

Fuente: Universidad Autónoma de Madrid [26].

Evaluación del ajuste: dependiendo del ajuste de los datos al modelo obtenido que explica la relación entre las variables independientes con la variable dependiente se utiliza una medida numérica que evalúe el ajuste de estas. La medida corresponde al coeficiente de determinación (R^2) el cual mide la proporción de variabilidad explicada por el modelo y su interpretación se refiere a cuando el R^2 es cercano a cero la proporción de variabilidad explicada por el modelo es pequeña y por lo tanto su ajuste es malo, mientras que cuando el R^2 es proximo a 1 su proporción de variabilidad explicada por el modelo es buena y su ajuste también [26].

1.3.6. Prueba estadística t de Student.

La distribución t de Student se define como una distribución de probabilidad que surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño. Este tipo de pruebas se utilizan cuando las muestras elegidas son provenientes de distintos tratamientos y dependiendo de cómo es la construcción de las observaciones se pueden aplicar pruebas para muestras apareadas (cuando para cada observación en un grupo se tiene una observación asociada al segundo grupo) y muestras independientes (cuando puede suponerse que los individuos de un grupo de tratamiento han sido extraídos independientemente de los otros) [27].

Por lo tanto el t de Student para muestras apareadas se basa en que teniendo en cuenta las condiciones de validez, las diferencias deberían ser aproximadamente normales de media cero. Si al calcular la media de las diferencias, el valor obtenido en la muestra no es consistente con una posible media de cero, se rechaza la hipótesis nula. Es decir, si la diferencia entre lo observado y la hipótesis nula no es atribuible al puro azar se acepta que hay diferencias entre los grupos [27].

1.3.7. Análisis de Componentes Principales.

El concepto de análisis de componentes principales, se basa en un método estadístico descriptivo que tiene como premisa estudiar las relaciones que existen entre variables cuantitativas. También, tiene como objetivo sintetizar y dar una estructura a la información contenida en una matriz de datos. El desarrollo de este, parte de una matriz Y, de dimensiones n x p, donde p corresponde al número de variables observadas en n individuos. Dicha matriz debe ser estandarizada de manera que se obtengan promedios nulos y varianzas unitarias por variable. Por otra parte, la matriz X es el resultado de la siguiente transformación [28]:

Ecuación 5.

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{s_j \sqrt{n}}$$

En donde, $\bar{y}_j$ y s_j son el promedio y la desviación estandar para cada una de las variables. Una vez se tiene claro dichos conceptos, se determinan los valores y vectores propios de la matriz $X'X$. Por una parte, los valores propios corresponden

a la varianza de los valores en cada uno de los componentes y los elementos de los vectores propios corresponden a las coordenadas en el espacio inicial que dan la dirección de los componentes principales [28].

A su vez el ACP consiste en homologar dichos datos a un espacio vectorial, en donde se toman unos ejes o dimensiones como referencia, que siendo de combinación lineal de las variables introducidas: no pierdan la información inicial al conservar la varianza total, no tengan correlación entre ellos, es decir que sean linealmente independientes y que tengan una importancia diferencial y conocida en la explicación de la varianza total [29].

Una vez se tienen los requisitos anteriormente mencionados, el objetivo básico consiste en reducir el número de variables introducidas. Para el desarrollo de este se toman como nuevas variables los ejes o componentes hallados, asignando un número y peso de los mismos, suficiente para que la pérdida de varianza total sea sólo la favorable, y de esta forma simplificar, reducir y estructurar la información inicial [29].

La ecuación base del análisis de componentes principales es [28]:

Ecuación 6.

$$Z = XU$$

Dónde [28]:

Z = es la matriz de componentes principales.

X = es la matriz de valores iniciales estandarizados.

U = es la matriz de vectores propios de la matriz $X'X$ o matriz de correlación R .

El resultado obtenido de este análisis se puede representar en dos tipos de gráficas, el diagrama de variables o círculo de correlación, en donde se muestran las variables utilizadas en un plano factorial retenida [28].

1.3.8. Paquete estadístico IBM SPSS.

El software IBM SPSS es un sistema global utilizado para el análisis y procesamiento de datos cuya función principal es generar informes tabulares,

gráficos y diagramas de distribuciones y tendencias, estadísticos descriptivos y análisis estadísticos complejos utilizando un lenguaje de comandos [30].

En cuanto al presente proyecto el paquete estadístico en su complemento de **regresión** proporciona técnicas para el análisis de datos que no se ajusten a los modelos estadísticos tradicionales, en donde se incluye la regresión lineal que debe ser ajustada a los requerimientos que el usuario desee [30].

1.3.9. Paquete estadístico R.

R es un conjunto integrado de programas que permiten la manipulación de datos, cálculos y gráficos principalmente. También está compuesto por una serie de características que permiten al usuario trabajar de forma integral en lo que se refiere a el almacenamiento y manipulación efectiva de datos, operadores para cálculo sobre variables indexadas (en particular matrices), posibilidades de gráficas para el análisis de datos, y un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo, que incluye condicionales, ciclos, funciones recursivas y posibilidad de entradas y salidas [31].

1.3.10. ArcGis 10.2.

ArcGis es un sistema cuyas características permiten hacer una recopilación, organización, administración, análisis y distribución de información geográfica para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), esta herramienta permite elaborar mapas que muestran, integran y sintetizan completas capas de información geográfica y descriptiva de diversas fuentes, también permite crear fácilmente datos geográficos mediante digitalización inteligente, con la que es posible dibujar entidades directamente en un mapa y almacenarlas en la base de datos geográfica del sistema [32].

1.4. MARCO INSTITUCIONAL.

La Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, providencia y Santa Catalina (CORALINA) en respuesta a una solicitud realizada por los autores para la obtención de las series de tiempos de los parámetros físicos, químicos y biológicos, manifestó su interés en hacer parte del proyecto y de hacer su mención en la ejecución del presente, con fines de implementar una herramienta de análisis dentro de la corporación que permita identificar la

variabilidad de la calidad hídrica en las zonas aledañas a las estaciones de monitoreo, de forma que garantice el bienestar de la fauna y flora del ecosistema en relación y de los usuarios que hacen parte de este con fines recreativos de contacto primario y secundario (Anexo 1).

Esta corporación con un compromiso de garantizar una calidad de vida digna para sus habitantes, visitantes y todo organismo vivo propio de su ecosistema, ofrece una oportunidad de promover de manera amplia un modelo de desarrollo sostenible que permita armonizar los diferentes programas trazados por la misma para garantizar la conservación de la Reserva de Biosfera declarada el 10 de Noviembre de 2000 por la UNESCO en su programa del Hombre y la Biosfera [33].

A su vez la corporación cuenta con una serie de funciones que en términos específicos del presente proyecto debe *“Ejecutar las políticas, los planes y programas nacionales en materia ambiental definidos por la ley aprobatoria del Plan Nacional de Desarrollo y del Plan Nacional de Inversiones o por el Ministerio del Medio Ambiente, así como los del orden regional que le hayan sido confiados conforme a la ley dentro del ámbito de su jurisdicción.”* Y *“Promover y realizar conjuntamente con los organismos nacionales adscritos y vinculados al Ministerio del Medio Ambiente, y con las entidades de apoyo técnico y científico del Sistema Nacional Ambiental (SINA), estudios e investigaciones en materia de medio ambiente y recursos naturales renovables.”*, entre otras [33]. Lo que conlleva a que el presente proyecto se ejecute con la finalidad de ser una herramienta de apoyo para la corporación, y de esta forma cumplir con las funciones anteriormente mencionadas para el bienestar ecosistémico, social y económico de la Isla.

1.5. MARCO LEGAL.

De acuerdo a la normativa legal vigente en cuanto a calidad hídrica, el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se rige por el decreto único reglamentario del sector ambiental 1076 del 2015, en donde el capítulo 3 que hace referencia al ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos según los parámetros establecidos para la evaluación de la calidad hídrica con base al tipo de uso de la misma establece los siguiente límites permisibles según su uso [34]:

- Uso recreativo de contacto primario como la natación y el buceo y de contacto secundario como los deportes náuticos y la pesca.

- Uso para la preservación de flora y fauna que su utilización este destinada a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Tabla 4: Criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos de contacto primario, secundario y preservación de flora y fauna.

Uso	Referencia	Expresada como	Valor
Destinación del recurso para fines recreativos de contacto primario.	Coliformes fecales.	NMP.	200 microorganismos/100 ml.
	Coliformes totales.	NMP.	1000 microorganismos/100 ml.
	Oxígeno disuelto.		70% concentración de saturación.
	pH.	Unidades.	5.0-9.0 unidades.
Destinación del recurso para fines recreativos de contacto secundario.	Coliformes totales.	NMP.	5000 microorganismos/100 ml.
	Oxígeno disuelto.		70% concentración de saturación.
	pH.	Unidades.	5.0-9.0 unidades.
Destinación del recurso para preservación de flora y fauna.	Oxígeno disuelto.		4 mg/L
	pH.	Unidades de pH.	6.5-8.5 unidades.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [34].

A su vez otros parámetros que son de importante relevancia para determinar la calidad del agua y de los cuales se cuentan con datos son: DBO y Solidos Suspendidos Totales (mg/l).

2. DESARROLLO CENTRAL.

2.1. METODOLOGÍA.

Con base en revisión bibliográfica realizada en revistas indexadas y en el uso de las bases de datos suministradas por CORALINA se planteó el método de análisis estadístico adecuado para la zona de estudio, teniendo en cuenta los parámetros físico-químicos y biológicos disponibles en esta para generar el diagnóstico de la calidad hídrica, los escenarios futuros con base en la variabilidad de los parámetros según el aumento poblacional y por último la propuesta de soluciones ambientales que abarquen herramientas, técnicas y/o actividades que permitan el manejo adecuado del recurso hídrico.

Por lo tanto la metodología corresponde a una serie de actividades acordes a cada objetivo específico planteado que se pueden observar a continuación:

Objetivo 1: Realizar un diagnóstico de la calidad del agua de la zona nerítica superficial de San Andrés Isla teniendo en cuenta la información de los parámetros físico-químicos y biológicos del agua tomados por CORALINA desde el año 1998 hasta el año 2014.

Actividades.

1. Revisión bibliográfica de la calidad hídrica en la zona de estudio en cuanto a los históricos de datos para los parámetros fisicoquímicos y biológicos.

Desarrollo: por medio de la visita realizada a CORALINA, se indagó en la información y estudios pertinentes realizados en la isla, respecto a la calidad hídrica. A su vez, se solicitó y revisó los históricos de datos para los parámetros fisicoquímicos y biológicos medidos por la corporación en donde se determinaron los años que inicialmente pueden brindar mayor información para el estudio tanto en época seca como en época lluviosa.

El número de datos desde al año 1998 hasta el 2014 se contabilizo teniendo en cuenta las dos épocas del año y las 13 estaciones de monitoreo (tabla 5).

Tabla 5: Registro del número de datos por estación, por época y por parámetro para San Andrés Isla.

Estación	Parámetro											
	OD		SST		PH		DBO		CFS		CTT	
	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L	S	L

Punta Hansa	18	19	11	13	19	20	12	14	19	18	19	20
Hotel Isleño	19	19	12	12	20	20	14	14	20	18	20	18
Punta Norte	19	18	10	11	18	19	12	14	19	16	19	17
Cabañas Altamar	19	19	11	13	20	20	17	16	20	17	20	17
Alcantarillado	18	18	12	13	20	20	18	18	19	17	19	17
El Cove	18	18	11	13	19	20	18	18	18	18	18	19
Rocky Cay	20	17	13	12	20	19	13	14	18	18	18	18
Bahía Hooker Manglar	20	19	12	14	20	20	18	16	18	15	18	16
Bahía Hooker Plantas	20	19	13	14	20	20	19	18	18	16	18	16
Muelle	19	19	13	14	20	20	19	16	17	17	17	16
Johnny Cay	18	18	12	11	19	19	17	15	19	18	19	18
Influencia Basurero	10	11	10	11	12	12	11	12	12	12	12	12
Frente Sharky's	10	11	11	10	12	12	11	12	11	11	11	12
PROMEDIO	17,5	17,3	11,6	12,4	18,4	18,5	15,3	15,1	17,5	16,2	17,5	16,6
TOTAL	228	225	151	161	239	241	199	197	228	211	228	216

Fuente: Autores.

2. Selección de los parámetros fisicoquímicos y biológicos indicadores de calidad de agua que pueden ser utilizados para la ejecución del proyecto.

Desarrollo: con base en los datos suministrados por CORALINA, se realizó la selección de los parámetros más relevantes respecto a las concentraciones de mayor presencia para determinar la calidad hídrica de la zona de interés, en comparación con lo exigido por el Decreto 1076 de 2015 capítulo 3 en cuanto en lo que se refiere al ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos con base en los parámetros a tener en cuenta para los distintos usos que corresponden en este caso y que se pueden observar en la tabla 4 [34].

3. Análisis Estadístico.

Desarrollo: teniendo en cuenta que los datos suministrados por la corporación se refieren a un histórico de datos para época seca y lluviosa desde el año 1998 hasta el año 2014 y que solo se cuenta con un dato por época para cada año, se propuso realizar un análisis de colinealidad cuyo objetivo sea mejorar la evaluación en el análisis estadístico seleccionado por medio de la identificación de las variables que tengan alta colinealidad entre si y por lo tanto dupliquen la información en el método de análisis estadístico, identificando así cuales de estas deben ser excluidas [35].

A su vez por medio de la aplicación de un análisis estadístico descriptivo se determinaron algunos factores comunes que logren explicar la relación o interrelaciones entre las variables de estudio si las hay para los parámetros físicos, químicos y biológicos, en donde aquí es importante realizar una diferenciación entre los datos para época seca y los datos para época lluviosa y su respectivo grupo cuantitativo ya sean físicos, químicos y biológicos [36].

4. Selección del índice de calidad de agua para la zona de estudio.

Desarrollo: la selección del índice de calidad de agua utilizado para la ejecución del proyecto se basó en los parámetros físicos, químicos y biológicos exigidos por el decreto 1076 del 2015 capítulo 3 y que a su vez sean medidos en la zona de estudio. A su vez se desarrolló un índice con base en la segregación realizada para época seca y época lluviosa teniendo en cuenta que la aplicación de este índice se realizara en todos los primeros 100 metros de la zona nerítica superficial.

En primera instancia el índice seleccionado es de tipo cuantitativo, cuya clasificación es cualitativa, es decir el valor obtenido debe poder ser indicativo de la calidad del agua en la zona de estudio. También, el índice abarca tanto parámetros fisicoquímicos como biológicos teniendo en cuenta que las series de datos proporcionada por CORALINA no son lo suficientemente robustas para utilizar todos los parámetros que son incluidos en esta y que debido a la ausencia de temporalidad no son datos representativos del parámetro y por lo tanto fueron excluidos.

Estos parámetros corresponden a la selección previamente mencionada y que hace referencia a la tabla 4 del presente documento con la adición de DBO y Sólidos Suspendidos Totales (mg/l) debido a que se cuenta con un número de observaciones importantes para estos. Por lo tanto el índice seleccionado se ajustó a las condiciones previamente nombradas y a los datos cuya validación estadística permita identificar si son representativos, teniendo en cuenta que en caso de ser necesario, la base teórica del índice es modificable y permite lograr un mayor ajuste del mismo en el diagnóstico de la calidad hídrica de la zona de estudio con base en el histórico de datos.

5. Aplicación del índice de calidad de agua.

Desarrollo: ajuste y ejecución del índice seleccionado para determinar el estado del cuerpo de agua con base en el histórico de datos.

6. Desarrollo del mapa de calidad hídrica por medio de la herramienta ArcGis 10.2.

Desarrollo: por medio de la implementación de la herramienta ArcGis 10.2. y con base en los resultados obtenidos en el índice de calidad de agua ejecutado, se desarrolló el mapa del estado actual de calidad hídrica para la zona nerítica superficial de San Andrés Isla para época seca y lluviosa, teniendo en cuenta que el mapa está basado en el total de los datos y su medida de tendencia central representativa según sea el caso. Es decir, dependiendo de la variabilidad de los datos, el índice de calidad de agua seleccionado fue calculado con la media (baja variabilidad) o la moda (alta variabilidad) para asegurar que la representación del valor del índice mostrado en el mapa sea confiable en cuanto a la calidad de los datos y su variabilidad [37].

Objetivo 2: Diseñar diferentes escenarios futuros de la calidad del agua con ayuda de un método de análisis estadístico, a partir de parámetros físico-químicos y biológicos para la zona nerítica superficial perteneciente al mar de la Isla.

Actividades.

1. Revisión bibliográfica de la aplicabilidad de métodos de análisis estadísticos utilizados a nivel mundial, nacional y local para la determinación de calidad hídrica.

Desarrollo: por medio de la búsqueda realizada en bases de datos, repositorios, revistas indexadas y cualquier otra fuente de información confiable, se determinaron los métodos de análisis estadísticos utilizados en las diferentes escalas, como una herramienta de apoyo para la correcta selección del método de análisis que se adecue más a la base de datos con la que se cuenta y que fue aplicada en este estudio.

2. Selección del método de análisis estadístico adecuado para la zona de estudio.

Desarrollo: con base en la anterior revisión bibliografía y a partir de los parámetros utilizados para el diagnóstico de la calidad del agua mostrados en la tabla 4 se seleccionó el método de análisis estadístico de mayor adaptabilidad a la información con la que se cuenta teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- El análisis estadístico debe permitir realizar predicción a partir del resultado obtenido al ejecutarlo.

- El análisis estadístico debe estar diseñado para el estudio de series de tiempo que no tengan gran cantidad de datos por variable y que sin embargo pueda ser ejecutado para obtener resultados confiables.
- El análisis estadístico debe ser ejecutable en paquetes estadísticos que sean accesible a los autores ya sea por licencia de la universidad o por que sean de acceso libre.
- El análisis estadístico debe garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos teniendo en cuenta los requisitos en cuanto a cantidad de datos necesarios para lograr el mayor ajuste posible.
- El análisis estadístico debe contar con pruebas de validación para comprobar el ajuste de los resultados obtenidos.

3. Ejecución del método de análisis estadístico seleccionado.

Desarrollo: ejecutar el método de análisis estadístico con ayuda de un paquete estadístico que cuente con esta herramienta en su interfaz para obtener así, la forma de recalcular el índice de calidad de aguas marinas con base en los parámetros fisicoquímicos y biológicos seleccionados.

4. Validación del método de análisis estadístico seleccionado.

Desarrollo: una vez se ha ejecutado el método de análisis estadístico con un 70% de los datos pertenecientes a la serie de tiempo ya descrita, este fue validado con los datos sobrantes que corresponden a un 30% de la serie de tiempo para verificar que la forma de recalcular el índice de calidad de aguas marinas se ajuste y sea válido. Esto consiste en que con base en unos valores conocidos de las variables de entrada, en este caso el 30% de los datos suministrados por CORALINA, se produzcan los correspondientes resultados en las variables de estado y de salida del análisis estadístico comparando este nuevo 100% con el resultado obtenido por el índice seleccionado, por medio de una prueba estadística que permita identificar si los resultados obtenidos en ambos casos presentan una similitud estadística y son confiables.

5. Generación de los distintos escenarios futuros (mapas).

Desarrollo: por medio de la ejecución del método de análisis estadístico se determinó los escenarios futuros con base en el histórico de datos que alimentó el análisis estadístico para la generación de mapas cuya finalidad es poder mostrar como la calidad hídrica en la zona nerítica superficial variará a lo largo de los años con base en el comportamiento que se ha registrado y que podría registrarse en algún momento futuro.

Por lo tanto la variación de los parámetros fisicoquímicos y biológicos se hizo de acuerdo a la revisión bibliográfica y a los datos poblacionales de la zona de estudio que permitan identificar por medio de proyecciones, como estas variables pueden aumentar o disminuir afectando así la calidad del agua con base en el aumento poblacional y su relación con la producción per cápita de sustancias que al ser vertidas al mar puedan generar una variabilidad en los parámetros fisicoquímicos y biológicos seleccionados. Esta relación se desarrolló a lo largo de la ejecución del proyecto para determinar los posibles escenarios futuros que se podrían presentar.

Para fines prácticos del presente proyecto, la ejecución de mapas que representen los escenarios futuros planteados por medio del método de análisis estadístico de regresión lineal múltiple inicia por la digitalización del borde del terreno de San Andrés Isla y la zona nerítica superficial, seguido a esto se realizó el posicionamiento georreferenciado de las estaciones de muestreo con que cuenta CORALINA teniendo en cuenta la condición de insularidad de la isla que hace una variación en las coordenadas de las mismas [32].

Una vez se realizó la correcta ubicación de las 13 estaciones de muestreo se insertó en la tabla de atributos de la capa los valores del ICAM por estación para época seca y lluviosa, y los valores proyectados por las ecuaciones de regresión lineal múltiple para la generación del estado promedio de la calidad hídrica en la zona de interés y para los escenarios futuros respectivamente, en donde posteriormente por medio de la técnica de distancia inversa ponderada (IDW) cuya función es interpolar una superficie de raster a partir de puntos cuyos valores estén incluidos en la tabla de atributos se obtuvieron las representaciones de calidad hídrica en la zona de interés [32].

Objetivo 3: Plantear posibles soluciones ambientales que permitan el correcto manejo del recurso hídrico, con base en los diferentes escenarios resultantes del análisis estadístico realizado, como una base para la toma de decisiones.

Actividades.

1. Plantear posibles soluciones que puedan ser implementadas por CORALINA.

Desarrollo: por medio del criterio de los autores como futuros ingenieros ambientales y con base en estudios ya realizados a nivel internacional, nacional y local, se plantearon las posibles soluciones a partir de los escenarios futuros en cuanto a la calidad hídrica pronosticada por el método de análisis estadístico

ejecutado, que puedan ser objeto de consideración por CORALINA para el manejo adecuado del recurso hídrico como una medida preventiva. En donde se muestre de forma breve los beneficios que estas medidas podrían traer para la zona de estudio.

2. Desarrollo de metodología de seguimiento para la implementación del proyecto.

Desarrollo: de forma complementaria y en relación con el planteamiento de las posibles soluciones que CORALINA podría ejecutar para garantizar el manejo adecuado del recurso hídrico, se presenta una serie de pasos que permiten desarrollar las ecuaciones y los escenarios obtenidos con otros valores que se midan de forma directa por medio de muestreo y que puedan brindar a la corporación un diagnóstico en cuanto a calidad hídrica y las posibles actividades que se podrían ejecutar en caso de encontrar escenarios desfavorables que atenten con el bienestar del ecosistema.

2.2. RESULTADOS.

2.2.1. Análisis de la problemática ambiental.

La zona marítima-costera del departamento de San Andrés en la que se evidencia la mayor presencia de actividades turísticas y recreativas de contacto primario y secundario debido a que esta aloja la mayor cantidad de especies de flora y fauna propias del ecosistema de arrecife de coral, debe ser preservada y protegida en función principalmente de la calidad hídrica del océano en esta área de estudio.

Actualmente en el departamento, las principales problemáticas ambientales que afectan la calidad hídrica y por lo tanto el bienestar no solo económico y social de la población sino también el bienestar ambiental del ecosistema se originan debido a la falta de redes de alcantarillado (con un 56% de cobertura) en algunos sectores de la isla de lo que ha generado que los habitantes realicen la disposición final de las aguas residuales, negras y excretas por medio de pozos sépticos, vertimientos al aire libre como en patios, calles y terrenos baldíos [38].

De igual forma otro factor de consideración sobre la disminución de la calidad hídrica, se origina en el aumento de la población flotante con fines turísticos que según la directiva 91/271/CEE de 1991 por parte de la Comunidad Europea afirma que un huésped de hotel tiene un aporte de 2 habitantes equivalente por día, lo que significa que el aporte de la carga contaminante es el doble en cuanto al

turismo [39]. A su vez esto genera un aumento en el transporte marítimo con fines recreativos sumado a los fines comerciales, como la pesca que en la actualidad registra 42 embarcaciones industriales pertenecientes a 13 empresas de pesca industrial operando, sin considerar las embarcaciones y empresas no registradas [40].

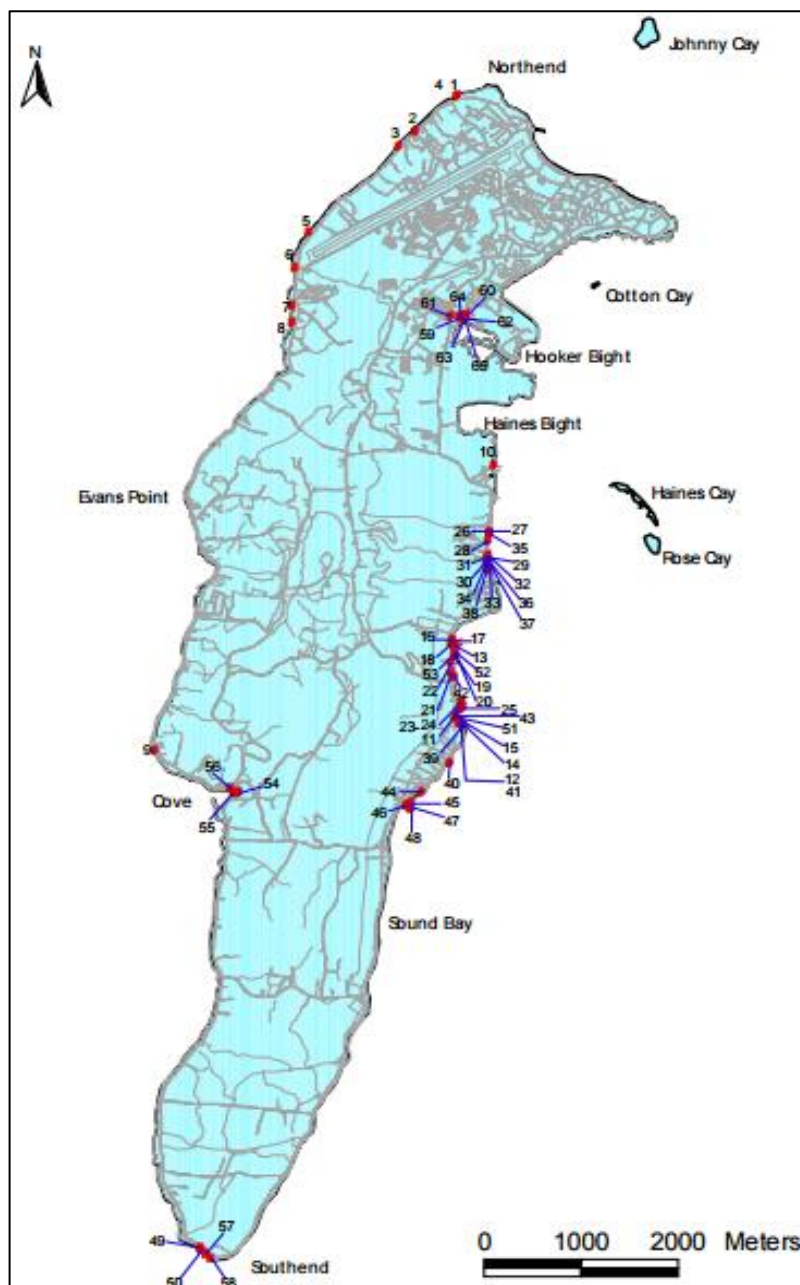
Este transporte marítimo conlleva a un deterioro de la calidad hídrica por parte de la presencia de aceites lubricantes que sumados a las aguas servidas municipales y al escurrimiento de los lixiviados por falta de control en la piscina de los mismos, llegan a la zona marítima- costera generando un impacto ambiental y paisajístico en los recursos marinos y en los ecosistemas de mangle [41] [42].

2.2.1.1. Infraestructura existente.

Con base en las problemáticas anteriormente descritas, especialmente frente a la ausencia del 44% de las redes de alcantarillado en la isla, en el año 2007-2008 por parte Proactiva Aguas del Archipiélago S.A. E.S.P se realizó la construcción y puesta en marcha del emisario submarino que basado en la capacidad de asimilación del mar bombea las aguas residuales departamentales para que estas se disuelvan luego de un tratamiento primario que incluye el cribado fino y grueso. A su vez esta herramienta tiene una capacidad de descarga de 380 litros por segundo y una vida útil de aproximadamente 50 años [43].

De forma complementaria el plan de saneamiento y manejo de vertimientos para la isla, realizó la identificación de puntos de vertimientos de aguas residuales que de forma descentralizada por medio de tanques sépticos, vertidos a campo abierto y por uso de letrinas, realizan un vertimiento sin tratamiento previo (ilustración 3). Esto con el objetivo de minimizar las descargas fortuitas por medio de la cobertura en estos sitios de la red de alcantarillado para realizar la descarga a partir de una tubería de impulsión sobre la línea de costa paralela al costado oriental de la Avenida Circunvalar [38].

Ilustración 3: Vertimientos puntuales identificados en la isla.



Fuente: PROACTIVA Aguas del Archipiélago S.A. E.S.P [38].

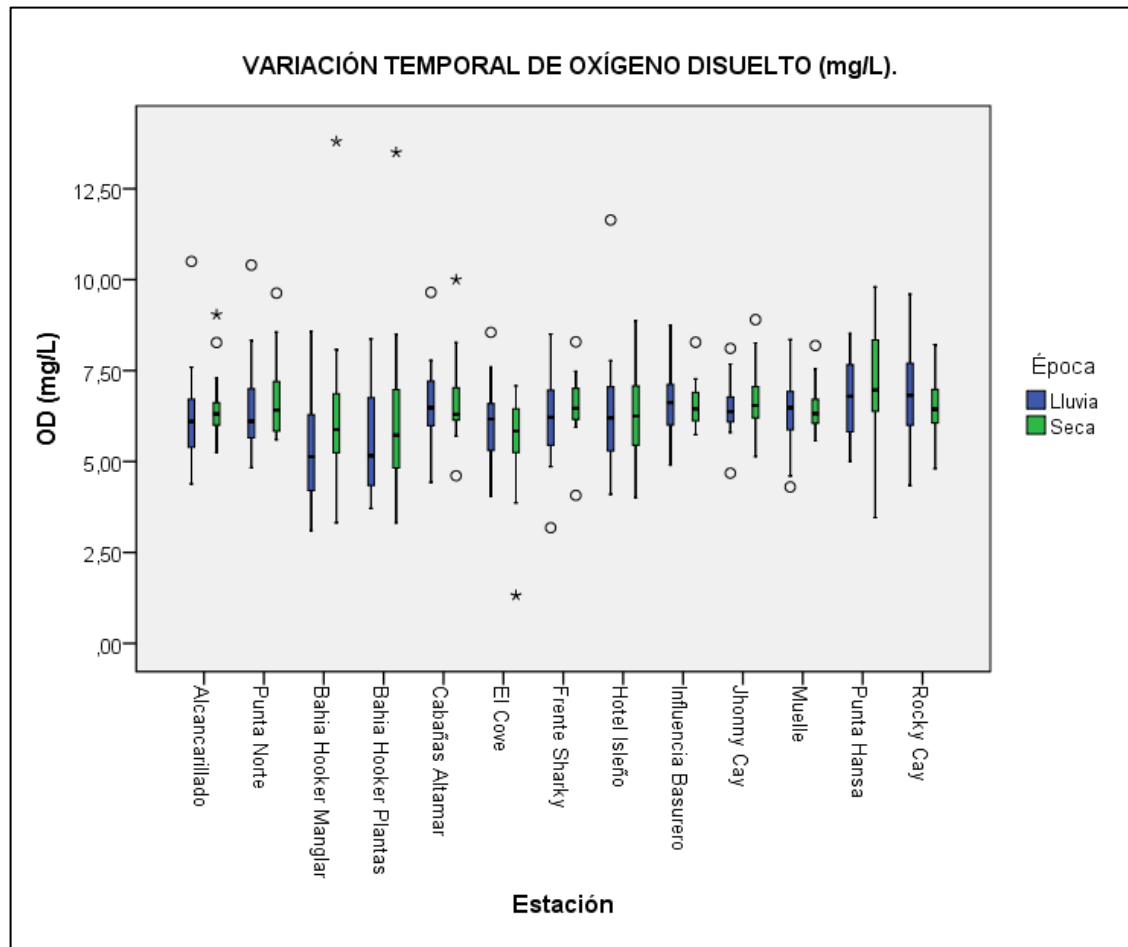
2.2.2. Análisis de series de tiempo.

Con base en las series de tiempo para los parámetros físico-químicos y biológicos se aplicaron las medidas de tendencia central como parte de la estadística

descriptiva para determinar el comportamiento de los parámetros y su temporalidad en las dos épocas de medición (seca y lluviosa) y de forma individual para cada una de las 13 estaciones de la red de monitoreo con que cuenta la isla. Teniendo en cuenta que el número de datos por estación, por parámetro y por época fueran lo más simétricos posibles (tabla 5) en cuanto a la cantidad de los mismos, para disminuir la diferencia entre los resultados obtenidos al momento de realizar los análisis propuestos a lo largo del documento.

Los resultados obtenidos se muestran por medio de diagrama de cajas que permiten evidenciar la simetría de los datos, sus valores extremos y en general la variabilidad de las observaciones por parámetros a lo largo del tiempo de medición.

Gráfica 1: Variación temporal de oxígeno disuelto (mg/L) en San Andrés Isla.



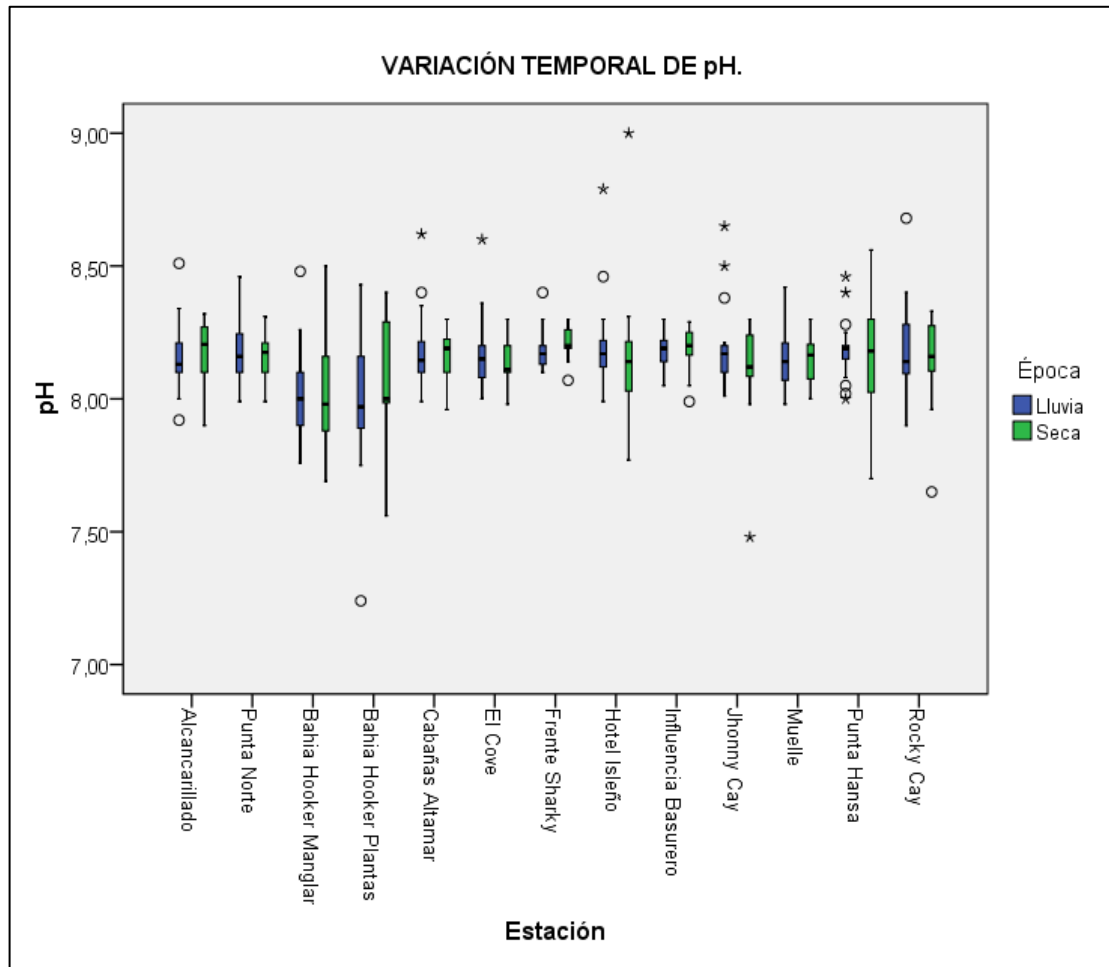
Fuente: Autores.

Según la gráfica 1, se puede observar que la concentración de oxígeno disuelto ha variado en un rango entre 4 mg/L a 8 mg/L aproximadamente, para las dos épocas del año. A su vez, se evidencian algunos puntos en su mayoría con altas concentraciones de OD en las estaciones de Bahía Hooker Manglar, Bahía Hooker Plantas, Cabañas Altamar y Alcantarillado, representados por el asterisco (*) los cuales se presentaron en época seca para dichas estaciones, esto debido posiblemente a que el OD se relaciona con el aumento de la descomposición de sustancias orgánicas originarias de vertimientos puntuales tanto de origen doméstico como de origen agropecuario [44].

Estos valores anteriormente mencionados no son representativos del comportamiento que ha presentado el parámetro a pesar de que respecto a la distribución de los datos no es posible identificar una tendencia en las estaciones, ya que la variación de estas para la época seca y lluviosa no muestra regularidad y el quintil 2 que representa el 50% de los datos varía en un rango de 5,1 mg/L a 7 mg/L, que en comparación con la norma legal vigente (decreto 1076 de 2015, capítulo 3, sección 9, artículo 2.2.3.3.9.7, 2.2.3.3.9.8 y 2.2.3.3.9.10), la cual indica que el OD adecuado para el cuerpo de agua es del 70% [34] en comparación con la temperatura promedio del agua en San Andrés Isla que es 29°C, el OD corresponde a 7,7 mg/L y su porcentaje mínimo es de 5,39 mg/L por lo que se evidencia que este parámetro sí está dentro de los límites permisibles [45].

Teniendo en cuenta las concentraciones registradas de OD para época seca y lluviosa, la gráfica 1 permite evidenciar que en época lluviosa dichas concentraciones en su mayoría son más bajas que en época seca lo cual es una consecuencia del intercambio de oxígeno mar-atmósfera y la influencia de los vientos alisios del norte que soplan intensamente en esta temporada del año [15]. De igual forma la disminución de oxígeno disuelto puede deberse como se mencionó anteriormente a los aportes de aguas residuales domésticos y las escorrentías que llevan altos contenidos de materia orgánica y que al interactuar en zonas como Bahía Hooker Plantas y Manglar que se caracterizan por la presencia de ecosistemas de manglar se generan condiciones anóxicas en el sedimento de fondo lo que conlleva a la disminución del oxígeno disponible en una columna de agua poco profunda, generando efectos adversos en procesos reproductivos o metabólicos de peces y otras especies [46] [47].

Gráfica 2: Variación temporal de pH en San Andrés Isla.



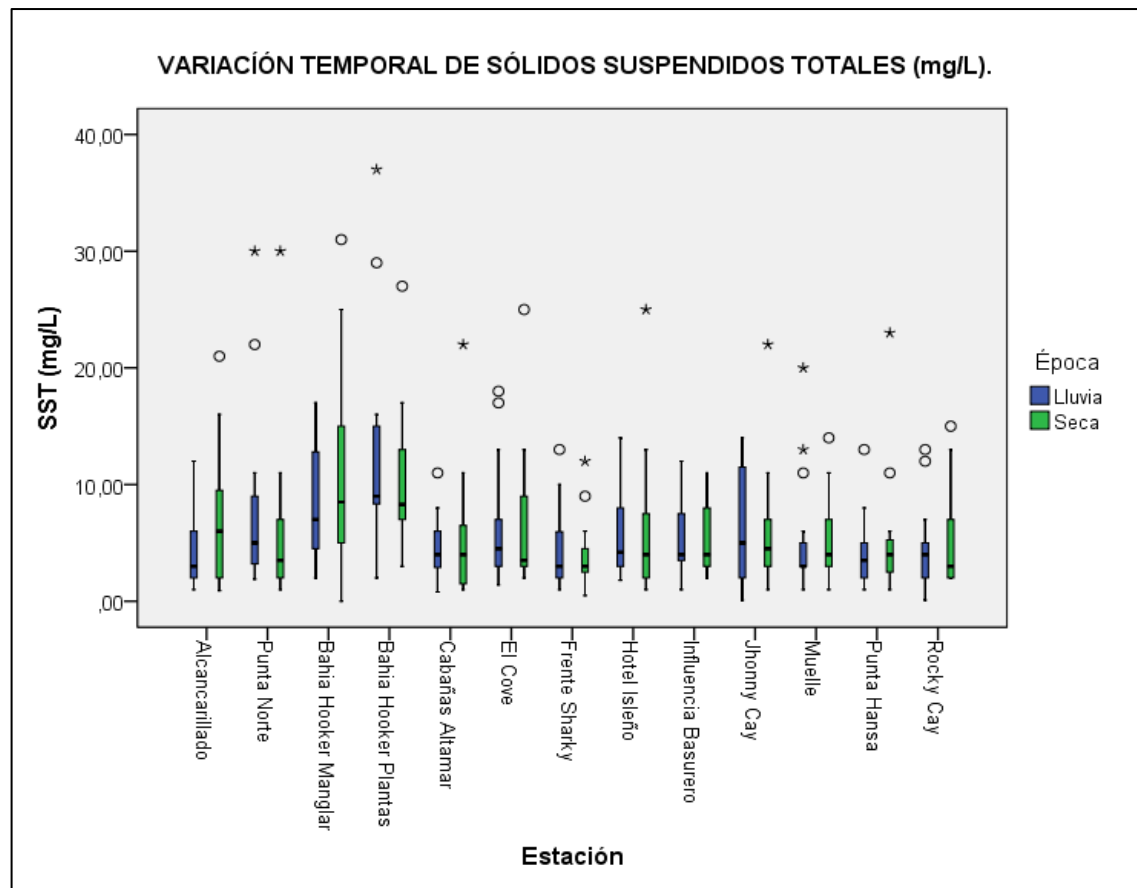
Fuente: Autores.

En la gráfica 2, se logra observar que los valores de las observación para pH oscilan entre un rango de 7,8 unidades de pH hasta 8,3 unidades de pH aproximadamente, lo cual es característico de las aguas oceánicas que son básicas y pueden oscilar entre 7,2 y 9 unidades de pH. Por otra parte no es posible observar una tendencia en la variación de las observaciones respecto a la época de monitoreo debido a que la agrupación de los datos varia por estación y no por época.

Respecto a los datos atípicos representados por asterisco (*) se denota que en las estaciones de Cabañas Altamar, El Cove, Hotel Isleño, Johnny Cay y Punta Hansa los cuales en su mayoría se presentaron en la época lluviosa, cumplen con los límites admisibles reflejados en la normatividad actual vigente con base en el uso recreativo de contacto primario, secundario y de preservación de flora y fauna, en

donde a su vez el quintil 2 que representa el 50% de los datos varía entre 7,9 y 8,2 unidades de pH aproximadamente.

Gráfica 3: Variación temporal de sólidos suspendidos totales (mg/L) en San Andrés Isla.



Fuente: Autores.

En cuanto a la gráfica 3, se puede observar que la variación para sólidos suspendidos totales se encuentra en un rango de 3mg/L a 15 mg/L aproximadamente. También se evidencia la presencia de valores atípicos con altas concentraciones para las estaciones de Punta Norte, Bahía Hooker Plantas, Cabañas Altamar, Hotel Isleño, Johnny Cay, Muelle y Punta Hansa para ambas épocas del año, que podrían ser valores indicativos de altas concentraciones de materia orgánica.

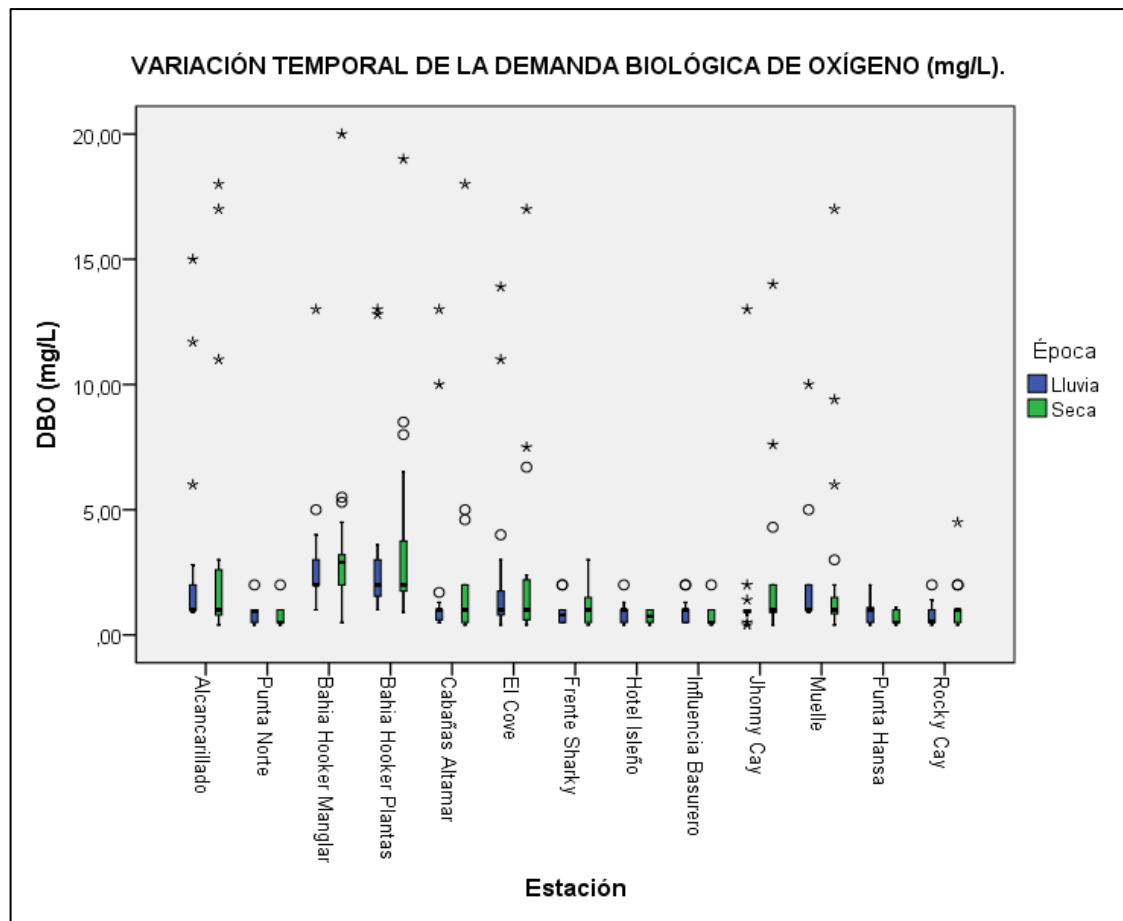
De forma específica las estaciones de Bahía Hooker Manglar y Bahía Hooker Plantas presentan las más altas concentraciones de SST debido a que estas se encuentran ubicadas en un ecosistema de manglar cuyo aporte de sólidos se

refiere que a este ecosistema se encarga de la retención de sedimentos y la filtración del agua, además de poseer grandes masas de materia orgánica que permiten mantener la red alimenticia de los organismos que habitan en el por medio de hojas y madera en descomposición en donde se suma que las características orográficas de la zona hacen de esta zona un sistema hídrico casi estacionario lo que no permite la dispersión de los contaminantes y contribuye a que se registren altas concentraciones de SST [48].

En cuanto al quintil 2 que representa el 50% de los datos de SST se encuentra en un rango de 3mg/L a 9mg/L aproximadamente lo que indica que de acuerdo a la resolución 631 de 2015 el cual en su artículo 8 establece los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, en donde en este caso San Andrés Isla cumple con esta normatividad por estar por debajo de 90 mg/L el cual corresponde al máximo valor establecido [49].

Respecto a los datos con altas concentraciones de SST en época lluviosa en comparación con la época seca, esto se puede originar debido a la esorrentía que llega a la zona costera sumado a las dinámicas de las aguas costeras del sector, la proliferación de algas marinas y la turbulencia del agua que mantiene en suspensión el material particulado [50].

Gráfica 4: Variación temporal de la demanda biológica de oxígeno (mg/L) en San Andrés Isla.



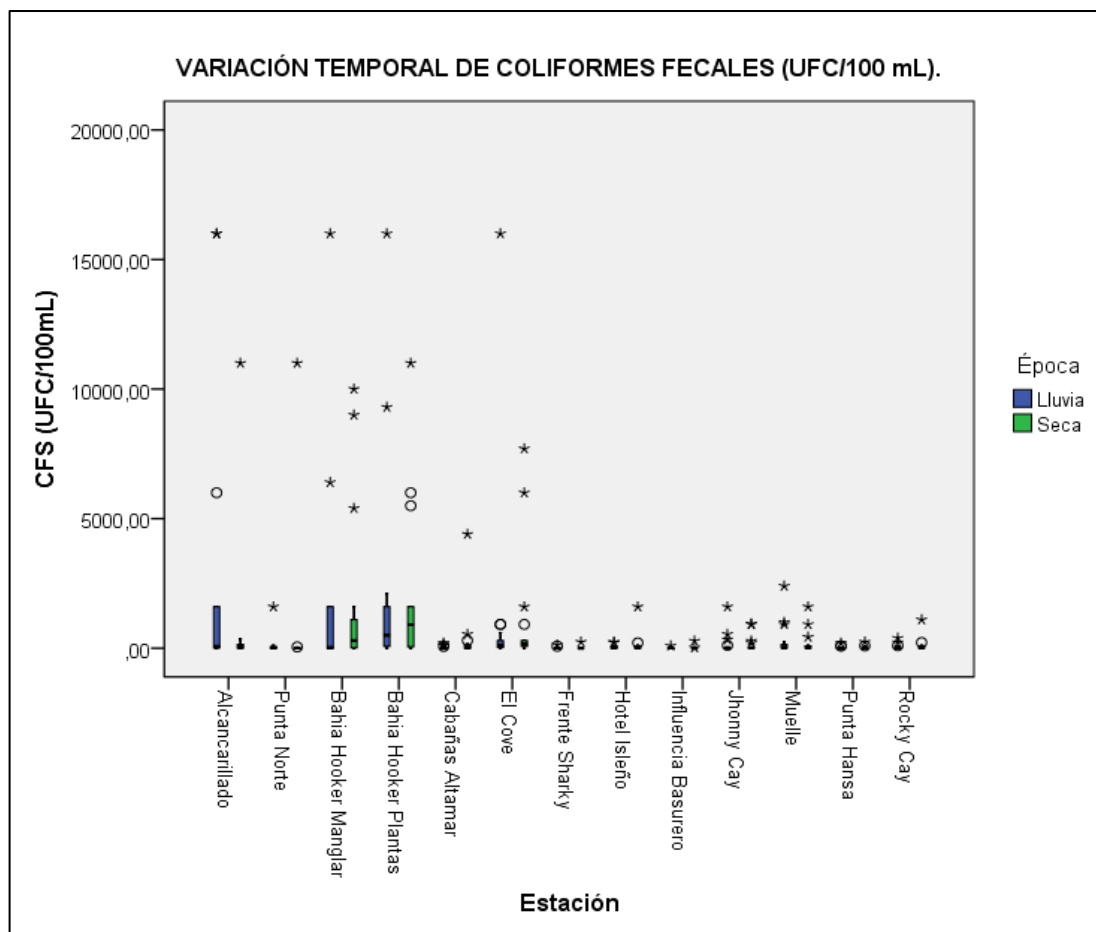
Fuente: Autores.

Para la gráfica 4, respecto a la demanda biológica de oxígeno se logra evidenciar altas concentraciones para las dos épocas del año en todas las estaciones, debido posiblemente a las altas concentraciones de materia orgánica que superan en gran magnitud la dispersión normal de los datos con base en la proporción de estos que se encuentra en un rango de 1 mg/L a 4 mg/L aproximadamente.

Siendo consecuente con los valores obtenidos y en comparación con la resolución 631 de 2015, artículo 8 en cuanto a los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas la DBO cumple con los estándares planteados por estar por debajo de 90 mg/L. En cuanto a los valores atípicos representados por el asterisco (*) se evidencia una gran cantidad de estos que se originan posiblemente a los vertimientos puntuales que se realizan alrededor de la isla tanto de origen

doméstico como de origen agropecuario que no cuentan con un tratamiento previo y se realizan de forma indiscriminada [42].

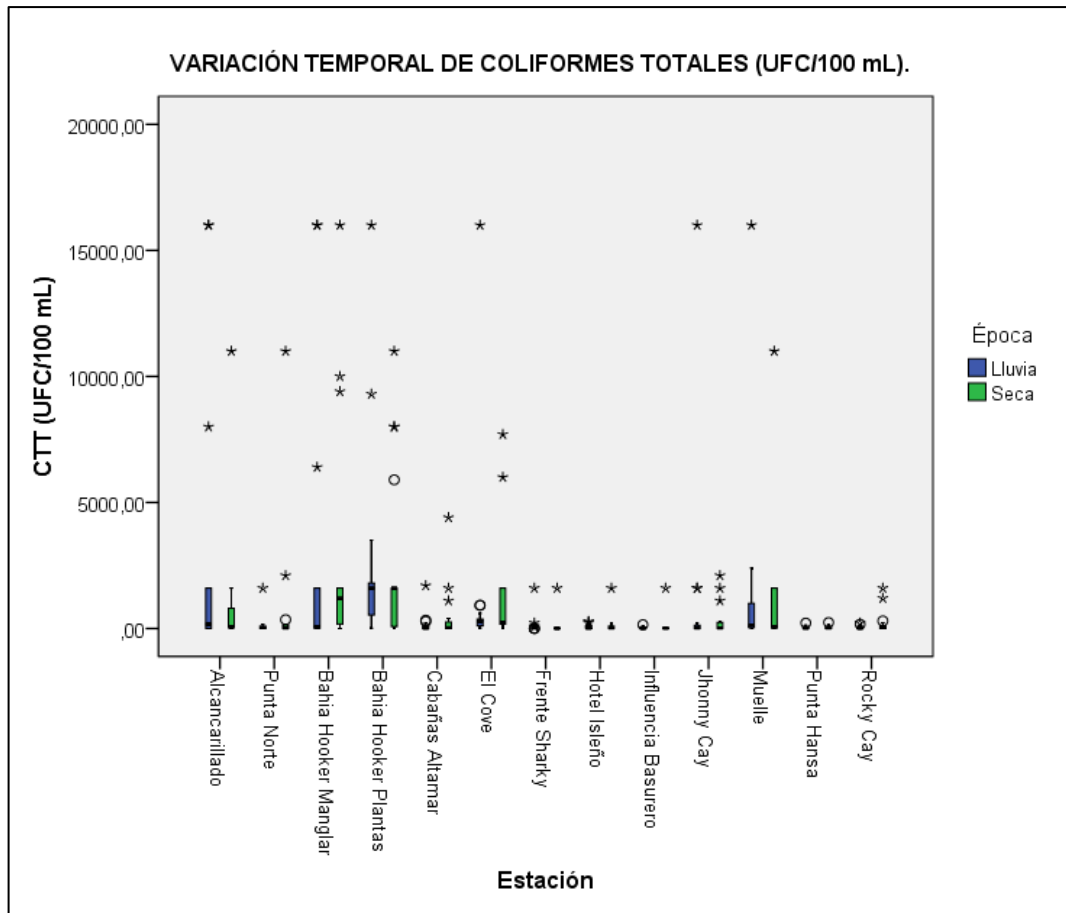
Gráfica 5: Variación temporal de coliformes fecales (UFC/100 mL) en San Andrés Isla.



Fuente: Autores.

Según la gráfica 5, no es posible encontrar una tendencia definida de las mediciones, debido a su alta dispersión y por lo tanto este parámetro debe ser analizado por observación ya que existe una alta presencia de datos atípicos con concentraciones superiores a la normatividad actual vigente (decreto 1076 de 2015, capítulo 3, sección 9, artículo 2.2.3.3.9.7) la cual indica que para el uso recreativo de contacto primario esta debe ser de 200 microorganismos por 100 mL.

Gráfica 6: Variación temporal de coliformes totales (UFC/100 mL) en San Andrés Isla.



Fuente: Autores.

En cuanto a la gráfica 6, que representa a los coliformes totales se puede observar al igual que en los coliformes fecales (gráfica 5) una alta presencia de valores atípicos que de igual forma deben ser analizados de manera individual ya que la normatividad legal vigente (decreto 1076 de 2015 capítulo 3, sección 9, artículo 2.2.3.3.9.7 y 2.2.3.3.9.8) establece que el límite permisible para el uso de agua recreativo de contacto primario y secundario debe ser de: 1000 UFC/ 100mL y 5000 UFC/100mL respectivamente.

Este comportamiento histórico general no evidencia una tendencia temporal definida pero permite identificar un aumento de las concentraciones en época lluviosa lo que se asocia al aumento de vertimientos de origen doméstico y el desbordamiento de pozos sépticos que se encuentran muy presentes en las zonas con ausencia de alcantarillado [15].

2.2.2. Aplicación del Índice de Calidad de Aguas Marinas (ICAM).

Con base en la ecuación 1 se puede observar que el índice agrupa a los parámetros en variables fisicoquímicas y en variables contaminantes de las cuales fueron tomadas únicamente 3 variables fisicoquímicas que son oxígeno disuelto, pH y sólidos suspendidos totales y 3 variables contaminantes que son demanda bioquímica de oxígeno, coliformes fecales y coliformes totales. Esto debido a que el monitoreo suministrado por la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA) desde el año 1998 a 2014 no evidencia una regularidad en los resultados de las mediciones para los otros parámetros excluidos por este estudio y que a criterio de los autores se excluyó el parámetro de salinidad, debido a que a pesar de su medición constante en la serie de tiempo, su inclusión en el índice implicaría que se incluyera otras variables de contaminación como hidrocarburos, metales pesados y/o plaguicidas de los cuales no se cuenta con información suficiente y esto generaría falta de simetría en las dos partes de la ecuación 1.

Teniendo en cuenta dicha selección de los parámetros ya nombrados se realizó una redistribución de los coeficientes de ponderación para completar el 100% tanto en las variables fisicoquímicas como en las de contaminación, asegurando así que la incertidumbre de la ecuación no interfiera en los resultados obtenidos y el valor de F_i en la ecuación cumpla con un valor igual a uno luego de realizar la sumatoria de cada parámetro para cada conjunto de variables (tabla 6).

Tabla 6: Valores de ponderación para cada parámetro fisicoquímico o de contaminación utilizado en el ICAM.

Variables Fisicoquímicas.		Variables de Contaminación.	
Parámetro.	Valor de ponderancia.	Parámetro.	Valor de ponderancia.
OD	0,3888	DBO	0,3654
SST	0,3333	CFS	0,3462
PH	0,2777	CTT	0,2885
Sumatoria	1	Sumatoria	1

Fuente: Autores.

La ejecución de éste y el cálculo del índice se realizó con la medida de tendencia central (media o moda según el caso), ya que algunos de los parámetros no

presentan una tendencia definida debido a su alta variabilidad y por ende no fue posible utilizar la media para todos y en casos como: coliformes fecales (UFC/100 mL), coliformes totales (UFC/100 mL) y sólidos suspendidos totales (mg/L) se utilizó la moda para calcular el índice. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 7: Índice de calidad de aguas marinas (ICAM) por estación para San Andrés Isla.

ESTACIÓN	ÉPOCA SECA				ÉPOCA LLUVIOSA			
	Parámetro	Valor de media o moda	Índice	Significancia	Parámetro	Valor de media o moda	Índice	Significancia
Punta Hansa	OD	7,210555556	97,60829	37,95010128	OD	6,747	98,63927	38,35094865
	SST	5,772727273	88,45455	29,4819	SST	4,442857143	91,11429	30,36839143
	PH	8,166842105	100	27,77000001	PH	8,185714286	100	27,77000001
	DBO	0,708333333	0	0	DBO	0,993333333	0	0
	CFS	29,36842105	8,920536	3,088289419	CFS	28,21052632	8,774802	3,037836428
	CTT	51,68421053	1,120274	0,323199163	CTT	45,52631579	0,977134	0,281903134
	ICAM			92,11371187	ICAM			93,16960053
Hotel Isleño	OD	6,323157895	99,36739	38,6340421	OD	6,373	99,28512	38,60205402
	SST	6,25	87,5	29,16375	SST	5,923076923	88,15385	29,38167692
	PH	8,1595	100	27,77	PH	8,196666667	100	27,77
	DBO	0,728571429	0	0	DBO	0,873333333	0	0
	CFS	113,25	18,85959	6,52919123	CFS	44,10526316	10,75443	3,723182951
	CTT	130,7	2,88939	0,833589024	CTT	57,94736842	1,265067	0,364971705
	ICAM			88,20501185	ICAM			91,66557629
Punta Norte	OD	6,765	98,60559	38,33785275	OD	6,45	99,15739	38,55239214
	SST	6,6	86,8	28,93044	SST	8,754545455	82,49091	27,49422
	PH	8,158888889	100	27,77	PH	8,188947368	100	27,77000001
	DBO	0,775	0	0	DBO	0,835714286	0	0
	CFS	734,6111111	64,02525	22,16554085	CFS	126,875	20,36355	7,049861681
	CTT	773,7777778	13,39429	3,864253447	CTT	144,375	3,183131	0,918333411
	ICAM			69,00849846	ICAM			85,84841706
Cabañas Altamar	OD	6,646842105	98,82083	38,42153928	OD	6,632631579	98,84589	38,43128271
	SST	5,75	88,5	29,49705	SST	4,633333333	90,73333	30,24142
	PH	8,1635	100	27,77	PH	8,178	100	27,77000001
	DBO	2,255555556	5,136564	1,876900494	DBO	2,123529412	3,580985	1,308492038

	CFS	298,15	36,92118	12,78211258	CFS	33,52941176	9,442258	3,268909751
	CTT	427,3	8,510594	2,455306494	CTT	169,1176471	3,705548	1,069050722
	ICAM			78,57426971	ICAM			90,79625021
Alcantarillado	OD	6,499444444	99,07457	38,52019378	OD	6,191578947	99,58495	38,71862845
	SST	7,15	85,7	28,56381	SST	4,442857143	91,11429	30,36839143
	PH	8,172	100	27,77000001	PH	8,15047619	100	27,77000001
	DBO	3,5	24,20344	8,843935718	DBO	2,852631579	13,45122	4,915074472
	CFS	660,3157895	60,60051	20,97989701	CFS	2466,333333	90,48595	31,32623437
	CTT	959,7894737	15,43645	4,453415611	CTT	2603,166667	26,36763	7,607060987
	ICAM			60,57675545	ICAM			53,00865006
El Cove	OD	5,591111111	100	38,88000001	OD	6,088421053	99,75757	38,7857425
	SST	7,083333333	85,83333	28,60825	SST	6,514285714	86,97143	28,98757714
	PH	8,140526316	100	27,77000006	PH	8,155238095	100	27,77000001
	DBO	2,605555556	9,781028	3,573987459	DBO	2,421052632	7,24395	2,646939288
	CFS	1661,5	85,14788	29,4781973	CFS	1059,157895	75,04862	25,9818332
	CTT	1858	22,0176	6,352077894	CTT	1088,95	16,66673	4,808352882
	ICAM			55,85398741	ICAM			62,10619428
Rocky Cay	OD	6,521	99,03819	38,50604737	OD	6,823333333	98,49383	38,29440052
	SST	5,615384615	88,76923	29,58678462	SST	4,846153846	90,30769	30,09955385
	PH	8,154	100	27,77000001	PH	8,1865	100	27,77
	DBO	1,171428571	0	0	DBO	0,822666667	0	0
	CFS	99,5	17,31147	5,993231779	CFS	49,31578947	11,39365	3,944480989
	CTT	207,3333333	4,489937	1,295346937	CTT	46,36842105	0,996755	0,287563691
	ICAM			88,57425327	ICAM			91,93190969
Bahía Hooker manglar	OD	6,23	99,52123	38,69385433	OD	5,4215	100	38,88000016
	SST	12,07692308	75,84615	25,27952308	SST	8,606666667	82,78667	27,592796
	PH	8,0355	100	27,77000001	PH	8,026190476	100	27,77000001
	DBO	5,652631579	63,2134	23,09817702	DBO	2,952941176	15,01987	5,488262153
	CFS	1677,166667	85,30716	29,53333896	CFS	1729,625	85,81594	29,70947796
	CTT	2743,222222	27,29396	7,874307564	CTT	2584,470588	26,24813	7,572586826
	ICAM			31,23755386	ICAM			51,47246923
Bahía Hooker plantas	OD	6,208	99,55769	38,70802859	OD	5,525	100	38,88
	SST	10,17692308	79,64615	26,54606308	SST	12,78	74,44	24,810852
	PH	7,9625	98,87996	27,4589637	PH	7,98952381	99,43835	27,61403072
	DBO	3,831578947	30,14264	11,01412067	DBO	3,257894737	20,02371	7,316665222
	CFS	4225,222222	99,27376	34,36857409	CFS	2069,058824	88,39784	30,60333267
	CTT	5184,055556	55,94257	16,13943232	CTT	2503,529412	25,74092	7,426256132

	ICAM			31,19092829	ICAM			45,9586287
Muelle	OD	6,365	99,2983359	38,60719299	OD	6,365	99,2983359	38,60719299
	SST	5,153846154	89,6923077	29,89444615	SST	5,393333333	89,2133333	29,734804
	PH	8,145	100	27,77000004	PH	8,146666667	100	27,77
	DBO	2,573684211	9,329547	3,409016448	DBO	1,964705882	1,870464	0,683467516
	CFS	200,1176471	27,95656	9,67856107	CFS	278,3888889	35,21734	12,19224285
	CTT	1065,823529	16,4565	4,747699307	CTT	1462,882353	19,57987	5,648793593
	ICAM			78,43636235	ICAM			77,58749302
Johnny Cay	OD	6,685555556	98,75174	38,39467611	OD	6,460526316	99,13982	38,54556284
	SST	6,166666667	87,66667	29,2193	SST	6,108333333	87,78333	29,258185
	PH	8,124210526	100	27,77000001	PH	8,191	100	27,77000001
	DBO	2,329411765	6,056236	2,212948476	DBO	1,725	0	0
	CFS	131,8947368	20,9102	7,239109836	CFS	145,6842105	22,39151	7,751939071
	CTT	300,4736842	6,291688	1,815152117	CTT	1049,315789	16,30385	4,70366011
	ICAM			84,11676569	ICAM			83,11814867
Influencia Basurero	OD	6,614	98,87852	38,44397006	OD	6,6025	98,89855	38,45175438
	SST	5,6	88,8	29,59704	SST	5,341666667	89,31667	29,769245
	PH	8,185	100	27,77000013	PH	8,175384615	100	27,77000001
	DBO	0,809090909	0	0	DBO	1,007692308	0	0
	CFS	27,5	8,685255	3,006835345	CFS	16,30769231	7,262667	2,514335463
	CTT	155,3636364	3,416577	0,985682602	CTT	36,30769231	0,76139	0,219661127
	ICAM			91,81849225	ICAM			93,2570028
Frente Sharky's	OD	6,498	99,0770039	38,52113911	OD	6,140833333	99,6695411	38,75151759
	SST	4,227272727	91,5454545	30,5121	SST	4,536363636	90,9272727	30,30606
	PH	8,210909091	100	27,77000001	PH	8,184615385	100	27,77
	DBO	1,218181818	0	0	DBO	0,907692308	0	0
	CFS	27,09090909	8,633657	2,988971976	CFS	24,66666667	8,32727	2,882900801
	CTT	155,5454545	3,420421	0,986791394	CTT	158,2307692	3,47711	1,003146359
	ICAM			92,82747576	ICAM			92,94153044

Fuente: Autores.

De acuerdo a los resultados obtenidos mostrados en la tabla 7 se calculó el ICAM en todas las estaciones de estudio, para clasificarlas según el rango propuesto por el Instituto de Investigación Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis” mostrado en la tabla 1.

Por lo tanto las estaciones se clasificaron de acuerdo a su calidad de la siguiente manera:

Época Seca:

- Calidad óptima: Punta Hansa (92,1137), Influencia Basurero (91,8184) y Frente Sharky's (92,8274).
- Calidad adecuada: Hotel Isleño (88,2050), Cabañas Altamar (78,5742), Rocky Cay (88,5742), Muelle (78,4363) y Johnny Cay (84,1167)
- Calidad aceptable: Punta Norte (69,0084), Alcantarillado (60,5767) y El Cove (55,8539).
- Calidad inadecuada: Bahía Hooker Manglar (31,2375) y Bahía Hooker Plantas (31,1909).
- Calidad pésima: Ninguna estación.

Época Lluviosa:

- Calidad óptima: Punta Hansa (93,1696), Hotel Isleño (91,6655), Cabañas Altamar (90,7962), Rocky Cay (91,9319), Influencia Basurero (93,2570) y Frente Sharky's (92,9415).
- Calidad adecuada: Punta Norte (85,8484), Muelle (77,5874) y Johnny Cay (83,1181).
- Calidad aceptable: Alcantarillado (53,0086), El Cove (62,1061) y Bahía Hooker Manglar (51,4724).
- Calidad inadecuada: Bahía Hooker Plantas (45,9586).
- Calidad pésima: Ninguna estación.

En consecuencia se evidencia que la época lluviosa ha presentado una mayor cantidad de estaciones con calidad óptima en comparación con la época seca y que algunas estaciones como Punta Hansa, Alcantarillado, El Cove, Bahía Hooker Plantas, Muelle, Johnny Cay, Influencia Basurero y Frente Sharky's, no varían en su calidad respecto a la época es decir que de manera inicial no se evidencia una afectación de las variables climatológicas sobre la calidad de estas estaciones.

Por otra parte en cuanto a la calidad hídrica de la zona de estudio, se logra evidenciar que las dos estaciones con calidad inadecuada para la época seca debido a su bajos valores son: Bahía Hooker Manglar y Bahía Hooker plantas y que para época lluviosa la estación Bahía Hooker Plantas mantiene su calidad inadecuada mientras que Bahía Hooker Manglar la mejora a una calidad aceptable.

Al existir una diferencia en el aumento o disminución de las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos en las dos épocas del año, se debe considerar como factor principal el aumento de la población y la variabilidad climática. Es decir, que

al verse reflejada una clasificación de calidad de agua diferente en cada estación, esta se encuentra condicionada a el aumento de la población flotante y no flotante en conjunto con las variables climatológicas e hidrodinámicas que hacen una diferencia en cuanto al atractivo turístico para las dos épocas del año. Por lo tanto, se observa que la calidad mejora en algunas estaciones, lo que posiblemente se debe a la dispersión de los contaminantes por cambios en las corrientes marítimas generadas por vientos alisios y demás factores meteorológicos que inciden en este y que de igual forma pueden deberse a que en épocas lluviosas se evidencia una disminución en el turismo y por lo tanto una disminución en el volumen de vertimientos que se realicen al océano [16].

2.2.2.1. Representación gráfica del Índice de Calidad de Aguas Marinas (ICAM).

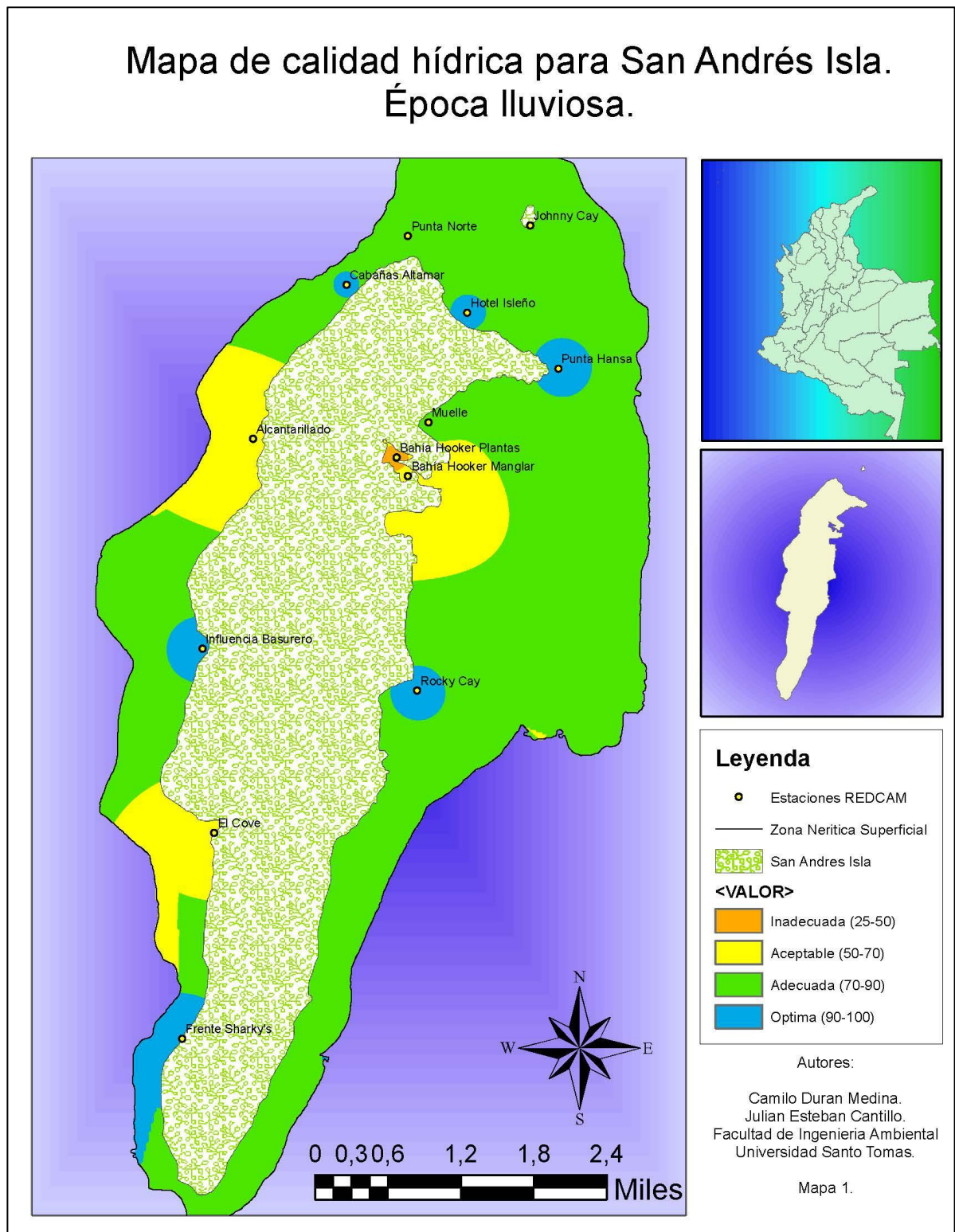
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la tabla 7, se realizó una representación gráfica por medio de mapas para época seca y lluviosa con la herramienta ArcGis 10.2 considerando la condición de insularidad de la isla, en cuanto a la ubicaciones de las estaciones y la georreferenciación de las mismas utilizando las coordenadas descritas en la tabla 8 y por medio del sistema de coordenadas proyectadas MAGNA San Andrés, 2007.

Tabla 8: Coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo en San Andrés Isla.

Estación	Latitud	Longitud
Punta Hansa	12,581109	-81,686668
Hotel Isleño	12,587776	-81,697780
Punta Norte	12,596943	-81,705001
Cabañas Altamar	12,591108	-81,712503
Alcantarillado	12,572778	-81,723890
El Cove	12,525831	-81,728615
Rocky Cay	12,542778	-81,703892
Bahía Hooker Manglar	12,568328	-81,705001
Bahía Hooker Plantas	12,570548	-81,706390
Muelle	12,574716	-81,702501
Control Johnny Cay	12,598192	-81,690112
Influencia Basurero	12,547742	-81,730054
Frente Sharky's	12,501295	-81,732504

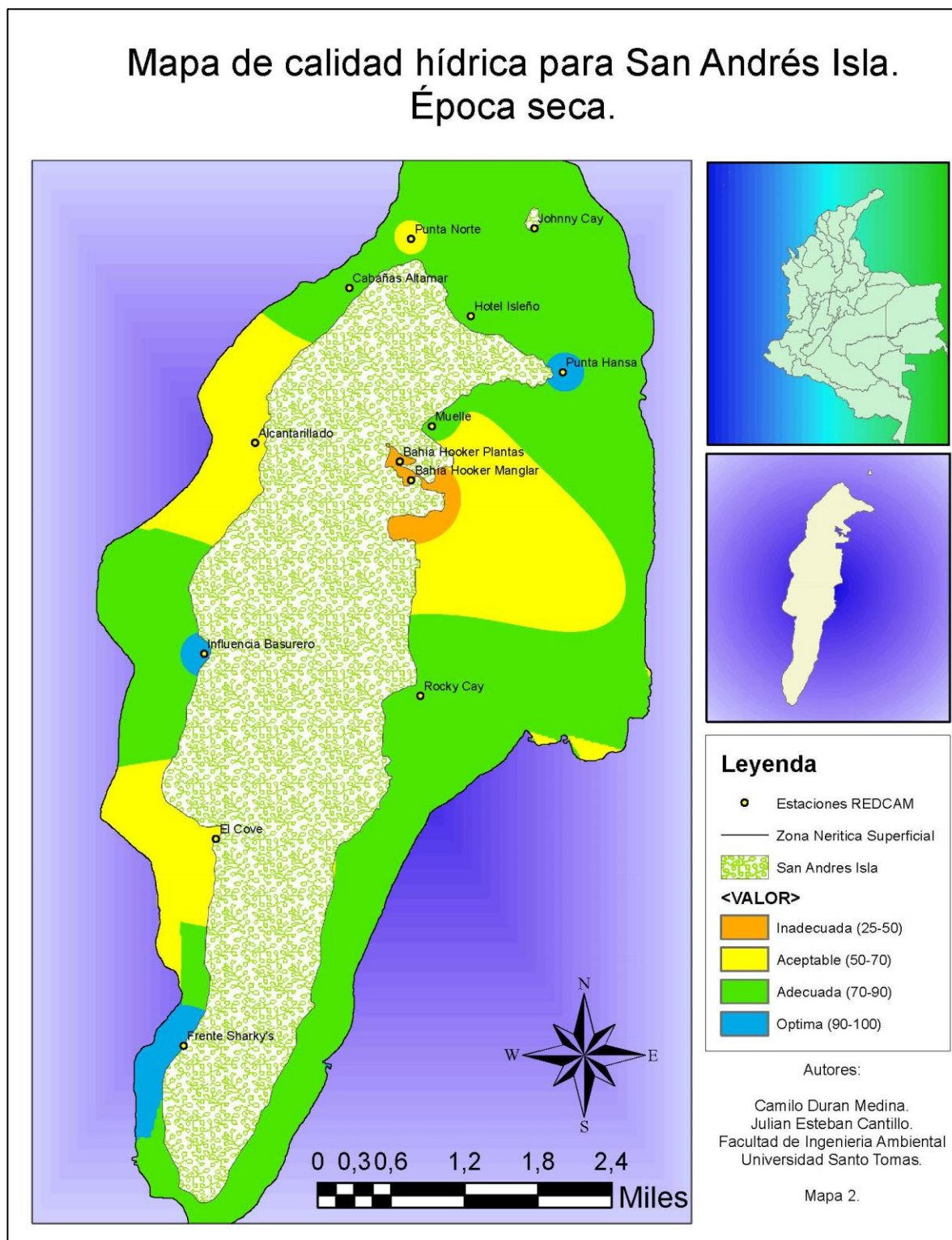
Fuente: CORALINA [33].

Ilustración 4: Mapa de calidad hídrica para San Andrés Isla en época lluviosa.



Fuente: Autores.

Ilustración 5: Mapa de calidad hídrica para San Andrés Isla en época seca.



Fuente: Autores.

Respecto a los dos mapas de calidad hídrica realizados con base en el ICAM, en primera instancia la ilustración 4 muestra el estado de la zona nerítica superficial respecto a calidad en la época lluviosa, donde es posible observar que la única estación con calidad inadecuada representada por el color naranja, es la estación de Bahía Hooker Plantas. Esto debido posiblemente a que en esta zona se realiza vertimientos puntuales de aguas residuales en la línea costera [38] alterando así las condiciones adecuadas de los parámetros fisicoquímicos y biológicos, sumado a que la ubicación de la estación hace referencia a una zona con altas concentraciones de materia orgánica y baja presencia de oleaje lo que interfiere en que los contaminantes que estén recibiendo no se dispersen y por lo tanto se mantengan en esta zona [48].

A su vez, otros puntos de consideración debido a que registraron una calidad aceptable hacen referencia a las estaciones Alcantarillado, Bahía Hooker Manglar y El Cove, las cuales corresponden a puntos de descarga realizados en esta zona que han sido seleccionados por la autoridad competente [38]. Por otra parte, la ilustración 5 correspondiente a la época seca registra variabilidad en cuanto a calidad hídrica según las estaciones Bahía Hooker Plantas y Bahía Hooker Manglar con una calidad inaceptable que de igual forma corresponden a los puntos de descarga [38] y se asocia dicho deterioro de calidad en esta época al aumento de la población flotante con fines turísticos y/o recreativos. En cuanto a las estaciones que registran una calidad hídrica aceptable para época seca, no se evidencia un cambio en las anteriormente nombradas con excepción de la estación Punta Norte que pasa de una calidad adecuada a aceptable.

Un cálculo aproximado de los vertimientos realizados asume una cantidad de 12.563 m³/día de aguas residuales domesticas en función del factor de consumo de la población y su nivel de complejidad alto. Estos vertimientos descargan a la zona costera 1.843 ton/año de solidos suspendidos totales, 266,957 NPM/año de bacterias coliformes termotolerantes y generan una demanda de 1.106 ton/año de DBO, las cuales pueden presentar riesgos sanitarios en las aguas costeras con fines recreativos y/o afectaciones sobre los ecosistemas marinos y sus recursos faunísticos y florísticos asociados [15]. A pesar de que las zonas costeras reciban diariamente aportes que podrían afectar las condiciones adecuadas para brindar un uso recreativo y de conservación de flora y fauna adecuados, se evidencia una calidad hídrica en su mayoría adecuada debido a los fenómenos hidrodinámicos que a partir del oleaje permiten una mayor dilución de las concentraciones en apoyo con la influencia de los vientos alisios del norte para el transporte de estos [15].

Por lo tanto en forma general, las demás estaciones para ambas épocas registran una calidad adecuada u óptima garantizando las condiciones apropiadas para el uso del agua con fines recreativos de contacto primario, secundario y de preservación de flora y fauna [34].

2.2.3. Ejecución del Análisis de Regresión Lineal Múltiple.

En lo que concierne a la selección del método estadístico que permitiera realizar proyecciones a partir de parámetros fisicoquímicos y biológicos para determinar la calidad hídrica de la zona de estudio y que de igual forma permita adaptarse a la cantidad de datos con la que se cuenta, se encontró que en varias ocasiones se ha utilizado el análisis de regresión lineal múltiple como una herramienta predictiva que permite identificar con base en distintos parámetros físicos, químicos, biológicos o la combinación de estos la calidad del agua en zonas costeras esto debido a su fácil ejecución y su adaptación a la cantidad de datos con que se cuenta [51].

De igual forma la selección y posterior aplicación del ARL se justifica que en según un estudio realizado en la playa de Santa Mónica, Estados Unidos se realizó una comparación de 5 diferentes modelos estadísticos que permitieran la notificación de las condiciones adecuadas de calidad hídrica para contacto primario donde se verificó que las ecuaciones obtenidas por dicho análisis no presentaban problemas de multicolinealidad, homocedasticidad y sus residuos tenían una distribución normal, teniendo en cuenta que la base de datos analizada no contaba con una distribución normal o una homogeneidad en las varianzas que es el caso concreto del presente estudio [4].

Por lo tanto y con la finalidad de sintetizar las ecuaciones obtenidas por medio del análisis de regresión lineal múltiple aplicado (anexo 2) , la tabla 9 muestra para cada una de las estaciones y su respectiva época, los valores de la constante y los coeficientes “B” para cada uno de los parámetros considerados como variables independientes (OD, SST, pH, DBO, CFS Y CTT), en donde también muestra el valor del coeficiente de determinación (R cuadrado) que indica el ajuste de las variables a la ecuación obtenida teniendo en cuenta que la variable respuesta es el ICAM y por último la prueba Durbin-Watson que permite determinar la presencia de auto correlación entre los residuos o errores de predicción [52].

Tabla 9: Resultados del análisis de regresión lineal múltiple por estación y época del año.

Estación	Época	Coeficientes							R cuadrado	Durbin-Watson
		Constante	OD	SST	PH	DBO	CFS	CTT		
Punta Hansa	Lluvia	57,055	-0,326	-0,736	5,464	0,578	N/A	-0,051	0,998	0,727
	Seca	83,262	-2,139	-0,68	3,602	N/A	-0,022	-0,005	0,998	2
Hotel Isleño	Lluvia	205,821	-0,196	-0,895	-12,435	-0,857	N/A	-0,043	0,999	0,222
	Seca	48,605	-1,12	-0,863	6,706	7,912	-0,05	-0,01	0,999	3,068
Punta Norte	Lluvia	66,06	0,77	-0,674	2,95	4,799	-0,019	N/A	0,999	1
	Seca	265,635	-1,189	-0,559	-19,097	-7,147	-0,009	N/A	0,998	2,667
Cabañas Altamar	Lluvia	48,47	-0,361	-0,645	6,34	1,404	-0,46	-0,004	0,997	2
	Seca	56,445	-2,203	-0,821	6,795	5,786	-0,071	-0,004	0,998	2,96
Alcantarillado	Lluvia	483,241	-3,691	-0,416	-40,357	-35,97	N/A	0	0,989	1,754
	Seca	162,734	-11,686	-0,565	1,239	-1,76	0,002	-0,01	0,996	2,733
El Cove	Lluvia	114,412	2,232	-0,64	-3,261	-6,5	-0,006	N/A	0,998	2,835
	Seca	89,303	-0,537	-0,902	1,51	0,735	-0,037	-0,002	0,999	1,896
Rocky Cay	Lluvia	104,334	-1,718	-0,289	N/A	1,181	0,363	-0,029	0,985	0,5
	Seca	136,655	-0,845	-0,653	-3,763	-1,401	-0,044	-0,005	0,986	2,196
Bahía Hooker Manglar	Lluvia	44,65	-2,52	-0,241	8,978	-5,102	-0,014	-0,005	0,998	2,367
	Seca	240,421	0,057	-0,792	-18,009	-2,268	-0,014	-0,005	0,997	2,448
Bahía Hooker Plantas	Lluvia	499,914	2,644	-0,95	-52,07	-0,204	-0,015	-0,007	0,957	1,708
	Seca	-329,725	-0,448	-0,05	55,612	-12,256	-0,007	-0,003	0,996	3,093
Muelle	Lluvia	164,208	-1,598	-0,52	-6,529	-3,368	0,037	-0,006	0,988	1,435
	Seca	94,863	1,416	-0,516	-0,656	-1,013	-0,017	-0,003	0,996	1,512
Johnny Cay	Lluvia	-7042,97	62,21	1,499	826,584	-34,934	-0,008	N/A	0,997	2,97
	Seca	-79,236	-0,054	-0,565	21,282	3,185	-0,015	-0,003	0,999	2,577
Influencia Basurero	Lluvia	154,104	-2,756	-0,765	-4,234	-0,866	-0,075	0,007	0,989	1,053
	Seca	76,575	N/A	-0,624	2,718	0,537	-0,059	0,012	0,999	3
Frente Sharky's	Lluvia	46,563	-0,305	-0,423	6,912	-3,155	-0,092	N/A	0,978	0,5
	Seca	237,249	-1,085	-0,577	-15,726	-2,41	0,003	-0,057	0,979	1,55

Fuente: Autores.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 9 se puede observar los coeficientes de cada uno de los parámetros en relación con la estación de monitoreo y su época del año, los cuales sirven para la construcción de las ecuaciones de análisis regresión lineal. Dichas ecuaciones se basan en un 70% de los datos para realizar una validación de los resultados obtenidos con el 30% restante, con el fin de garantizar la veracidad de las proyecciones que se realicen a partir de los coeficientes mostrados en la anterior tabla. Esto se logra debido a que el ajuste de las variables independientes a la variable dependiente es en

todos los 26 casos superior al 95% con un R cuadrado que brinda fiabilidad de las ecuaciones ya que explica en gran porcentaje la varianza, lo que indica que las variables predictoras si son explicativas de la variable dependiente o de respuesta [53].

A su vez, para comprobar que las ecuaciones de ARL cumplen con las condiciones de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de los datos, se verifica esto por medio del estadístico Durbin-Watson que evalúa la existencia de autocorrelación para determinar la presencia de algún tipo de dependencia entre las variables independientes [54].

Al analizar los valores obtenidos por el estadístico en la tabla 9, se evidencia que no se rechaza la hipótesis nula en cuanto a la ausencia de autocorrelación debido a que los valores se encuentran cercanos a 2 en un rango de 1 a 3 [54] con excepción de las ecuaciones resultantes para las estaciones en época lluviosa de: Punta Hansa, Hotel Isleño, Rocky Cay y Frente Sharky's. Esto debido posiblemente a que la temporalidad de los datos en cuanto a su muestreo no es similar en todas las estaciones y genera una falta de robustez en la base de datos, lo cual dificulta realizar un ARL más ajustado sin la posibilidad de excluir variables que son de importancia en cuanto a la medición y evaluación de la calidad hídrica.

2.2.3.1. Validación del Análisis de Regresión Lineal Múltiple.

Basados en el coeficiente de determinación y el estadístico Durbin-Watson se realizó una comprobación inicial de las ecuaciones resultantes del análisis de regresión lineal en cuanto al ajuste y la correlación de las variables independientes y la variable dependiente. Esto con el objetivo de verificar que las ecuaciones resultantes de los coeficientes mostrados en la tabla 9 realmente son predictoras y se ajustan a la situación de la calidad hídrica en la zona de estudio para cada una de las estaciones de muestreo y su respectiva época.

Por lo tanto, con el 30% de datos restantes se calculó el ICAM propuesto por el INVEMAR y se remplazaron dichos valores en las ecuaciones resultantes del ARL con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos por ambos métodos. Para esto se utilizó la prueba estadística t de Student en donde las variables utilizadas fueron denominadas como: ICAM_L, ICAM_S, ARL_L y ARL_S mostradas a continuación:

Tabla 10: Prueba de muestras relacionadas para las variables ICAM y ARL por época.

Prueba de muestras relacionadas									
		Diferencias relacionadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación típ.	Error típ. de la media	95% Intervalo de confianza para la diferencia				
					Inferior	Superior			
Par 1	ICAM_S - ARL_S	-5,75935	20,76088	2,68022	-11,12246	-,39625	-2,149	59	,036
Par 2	ICAM_L - ARL_L	-2,63525	16,26768	1,89108	-6,40416	1,13367	-1,394	73	,168

Fuente: Autores.

En consecuencia los resultados obtenidos mostrados en la tabla 10, evidencian que las variables pareadas fueron seleccionadas así de acuerdo a su época. La primera de estas, para época seca muestra que el contraste de diferencia de medias es de 5,75 unidades en cuanto al valor de calidad a favor de la variable ARL_S, de igual forma el intervalo de confianza del 95% refleja un rango de 11,1 a 0,39 unidades de calidad hídrica lo que resulta ser compatible con la columna de significancia bilateral en la que se muestra que el 3,6% del contraste es significativo y por lo tanto al ser un porcentaje muy bajo se considera la diferencia como no significativa y se concluye que entre ambas variables calculadas con diferentes ecuaciones no hay una relevante diferencia . Siendo este el mismo caso para la segunda pareja en época lluviosa que muestra 2,63 unidades de calidad hídrica a favor de la variable ARL_L y que en comparación con la significancia bilateral que es de 16,8% tampoco se considera que exista una diferencia significativa entre los valores.

2.2.4. Ejecución del Análisis de Componentes Principales.

Teniendo en cuenta la metodología utilizada para la ejecución del análisis de componentes principales mostradas en las ilustraciones 6,7 y 8 se evidencia que estas se diferencian según el tipo de agrupación realizada, es decir cada una de estas refleja el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos considerados (OD, SST, pH, DBO, CFS Y CTT) y en algunos casos el comportamiento del ICAM y la población de la isla, agrupados por año, estación y época según corresponda.

De manera inicial, las ilustraciones 5, 6 y 7 muestran la agrupación de las variables OD, SST, pH, DBO, CFS Y CTT (ítem A), su relación con la variable POBLACIÓN (ítem E) y con la variable ICAM (ítem D). A su vez, el ítem B es una ampliación del ítem C en donde se omiten los valores atípicos que influyen en la distribución de las demás observaciones y no permiten un análisis a profundidad.

En cuanto a la ilustración 6 que muestra la agrupación de los datos anualmente, se evidencia que en el ítem A, los años con mayor apertura en el factor de agrupación “año” como el 2001 y el 2003 se ven influenciados por la alta presencia de coliformes fecales y totales, siendo el caso contrario para el año 2000 en donde este evidencia un aumento significativo de la DBO y disminución del pH. De forma complementaria se observa que los años no mencionados se encuentran agrupados en el centro de las observaciones y por lo tanto al comparar estos con la variable POBLACIÓN e ICAM (ítem B) es válido mencionar que la calidad hídrica en estos fue buena y que ha mejorado en relación con el aumento poblacional de la isla (ítem E) en función del índice de calidad (ítem D) por su comportamiento en función directamente proporcional con las variables ya mencionadas.

Por otra parte al realizar el ACP con factor de agrupación “época” mostrado en la ilustración 7 se evidencia que la distribución de las observaciones por parámetro se encuentra concentrada en el centro de las observaciones (ítem A) y que su agrupación no es de importante consideración ya que no se observa una diferencia significativa entre las dos épocas, esto relacionado con las variables POBLACIÓN e ICAM, en donde a pesar del aumento poblacional y la mejora en la calidad hídrica no se denota una diferencia entre la época seca y lluviosa.

Ilustración 6: Análisis de Componentes Principales en cuanto a la agrupación anual para San Andrés Isla.

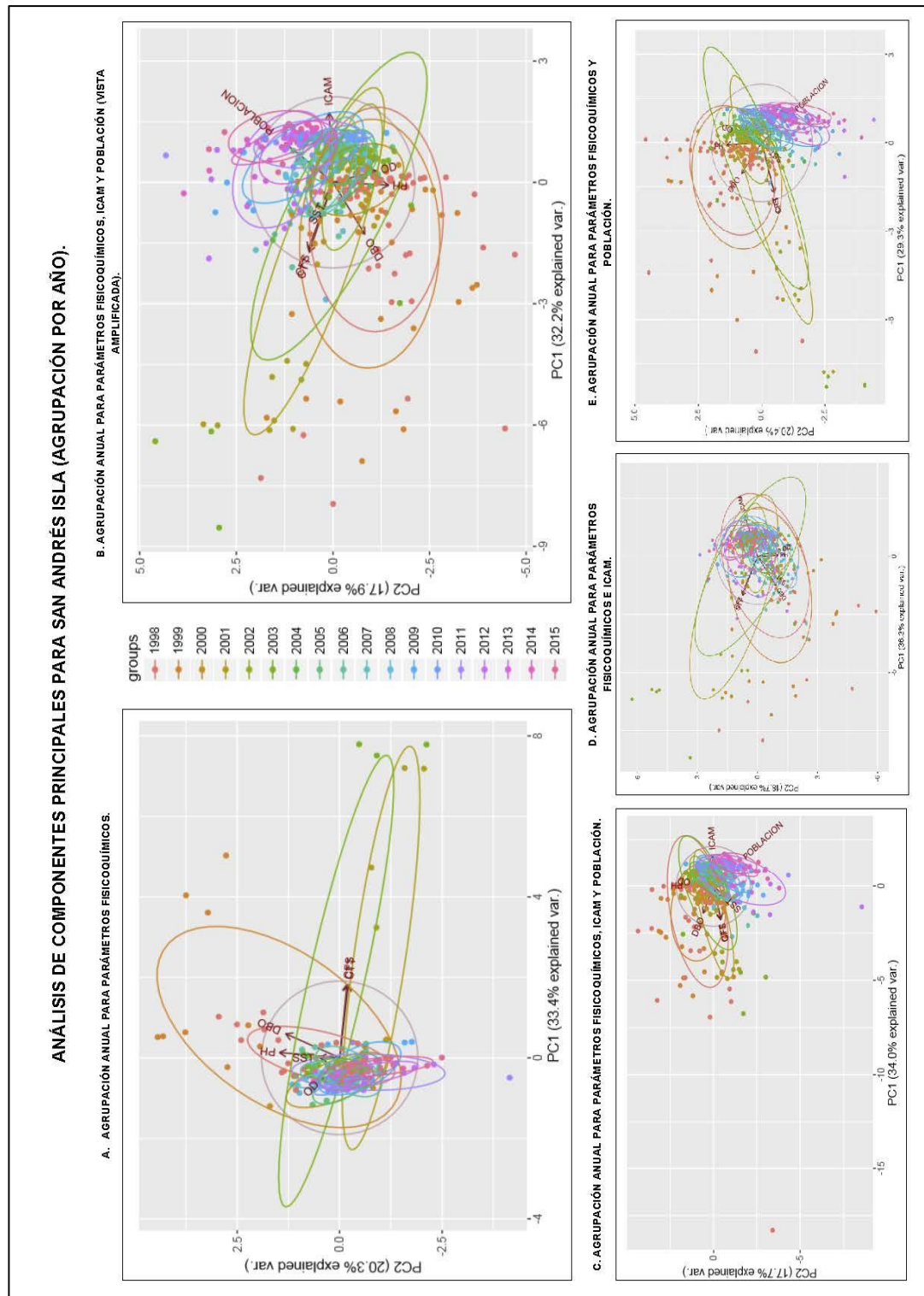


Ilustración 7: Análisis de Componentes Principales en cuanto a la agrupación por época para San Andrés Isla.

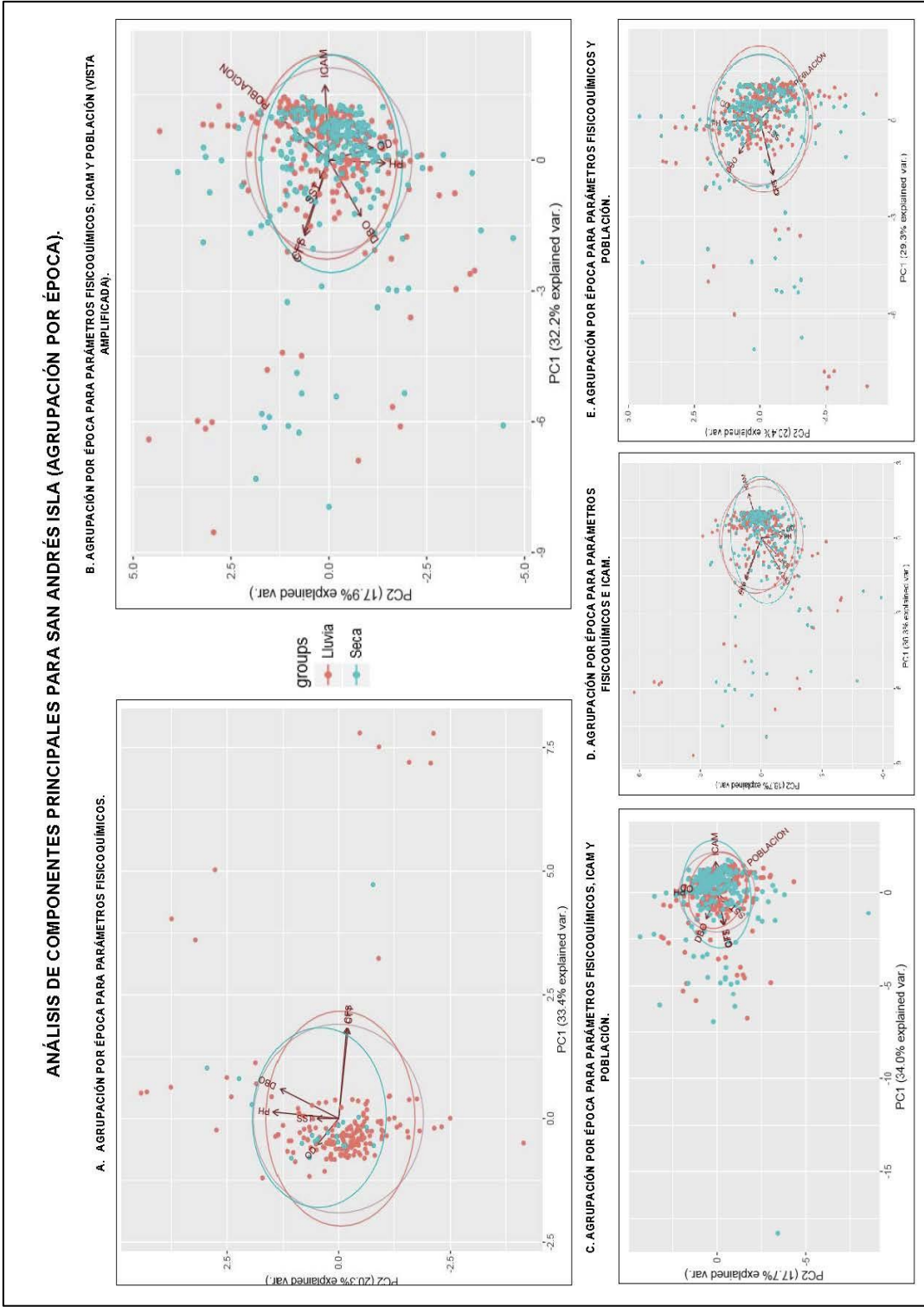
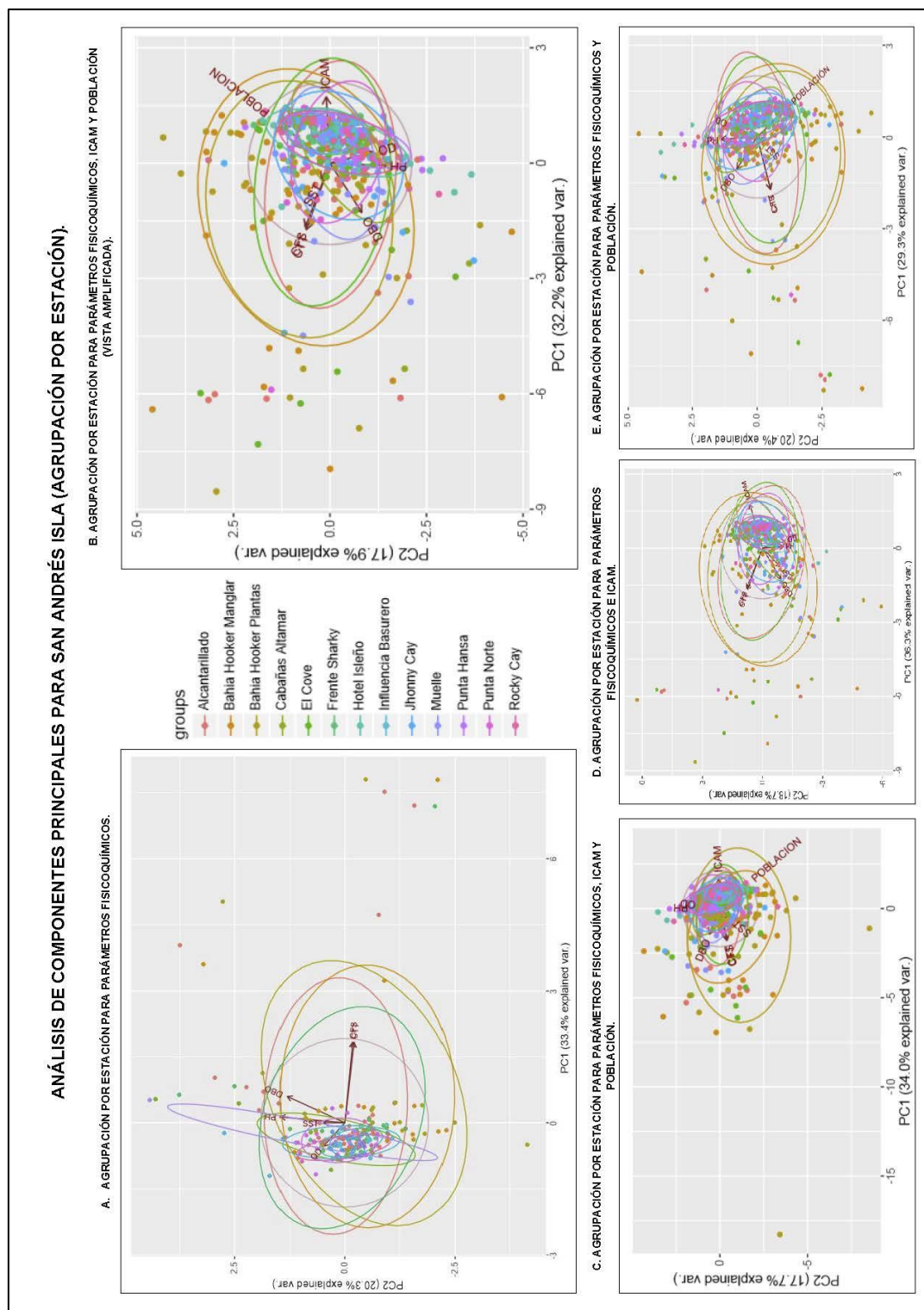


Ilustración 8: Análisis de Componentes Principales en cuanto a la agrupación por estaciones para San Andrés Isla.



Fuente: Autores.

A partir de lo anteriormente descrito y con base en la revisión bibliográfica realizada, se puede justificar que a pesar de que la población en la isla ha aumentado desde el año 1998 hasta el año 2014 y el ACP evidencia una mejora en la calidad hídrica de la zona a lo largo del tiempo se relaciona esto con la implementación del emisario submarino en el año 2008 que con base en el principio de dilución se realizó un vertimiento de las aguas residuales de la isla por una tubería de 20 pulgadas de diámetro a 20 metros de profundidad aproximada y con una longitud de 500 metros, lo que permite la conexión de una parte de la población a esta y por lo tanto la mejora de la red de alcantarillado para evitar y controlar la disposición inadecuada de las aguas residuales [43] .

En relación con lo anterior, con base en el plan de saneamiento y manejo de vertimientos de la isla (PSMV) se identificó en el año 2008 la dilución de vertimientos por medio de puntos de descarga para la población que no se encuentra conectada a la red (ilustración 3), esto con la finalidad de evitar que se realicen vertimientos inadecuados que puedan afectar las condiciones óptimas del cuerpo hídrico para el uso recreativo de contacto primario, secundario y de preservación de flora en fauna en donde estos en complemento con el emisario submarino garanticen la dilución en su mayoría de las aguas residuales domesticas en el océano sin afectar los parámetros fisicoquímicos y biológicos [38], lo que explicaría que se denote una calidad inadecuada en los años anteriores a la implementación de estas herramientas y que haya mejorado a lo largo del tiempo según la base de datos suministrada por CORALINA y el ACP realizado para esta.

En consecuencia al realizar otro ACP con factor de agrupación “estación” (ilustración 8) para identificar la relación de las estaciones con respecto a los puntos de descarga de aguas residuales (ilustración 3) , se evidencia que en el ítem A las distribuciones de las estaciones Alcantarillado, Bahía Hooker Manglar, Bahía Hooker Plantas y El Cove se ven afectadas en gran magnitud por los coliformes fecales y totales que en complemento con el ítem B y en comparación con los ítems D y E estas son las estaciones que presentan una calidad hídrica baja, lo que reflejaría que el ACP si coincide con los resultados obtenidos en la tabla 7 donde el ICAM para dichas estaciones se clasifica como aceptable e inadecuada según corresponda.

2.2.5. Desarrollo de escenarios futuros.

Los valores proyectados en función del histórico de datos anual por parámetro y su relación con la población se observan en la siguiente tabla, teniendo en cuenta la proyección poblacional del DANE para la isla en los años 2025 y 2035. De igual forma dicho valores representan las posibles concentraciones que se evidenciarían en dichos años teniendo en cuenta la misma unidad de medida para la concentración de cada uno.

Tabla 11: Proyección de las concentraciones en relación con la población de San Andrés Islas para el año 2025 y 2030.

AÑO	POBLACIÓN	CFS	CTT	OD	PH	DBO	SST
2025	82,050	164,2676	46,90575	5,45642	8,00637	4,203456	5,14803
2035	87,830	177,0358	332,1504	4,694892	7,93552	6,88773	4,08730

Fuente: Autores.

Los valores obtenidos de calidad hídrica para cada una de las estaciones en cuanto a las concentraciones proyectadas mostradas en la tabla 11 y su remplazo en las ecuaciones de regresión lineal múltiple, se observan a continuación:

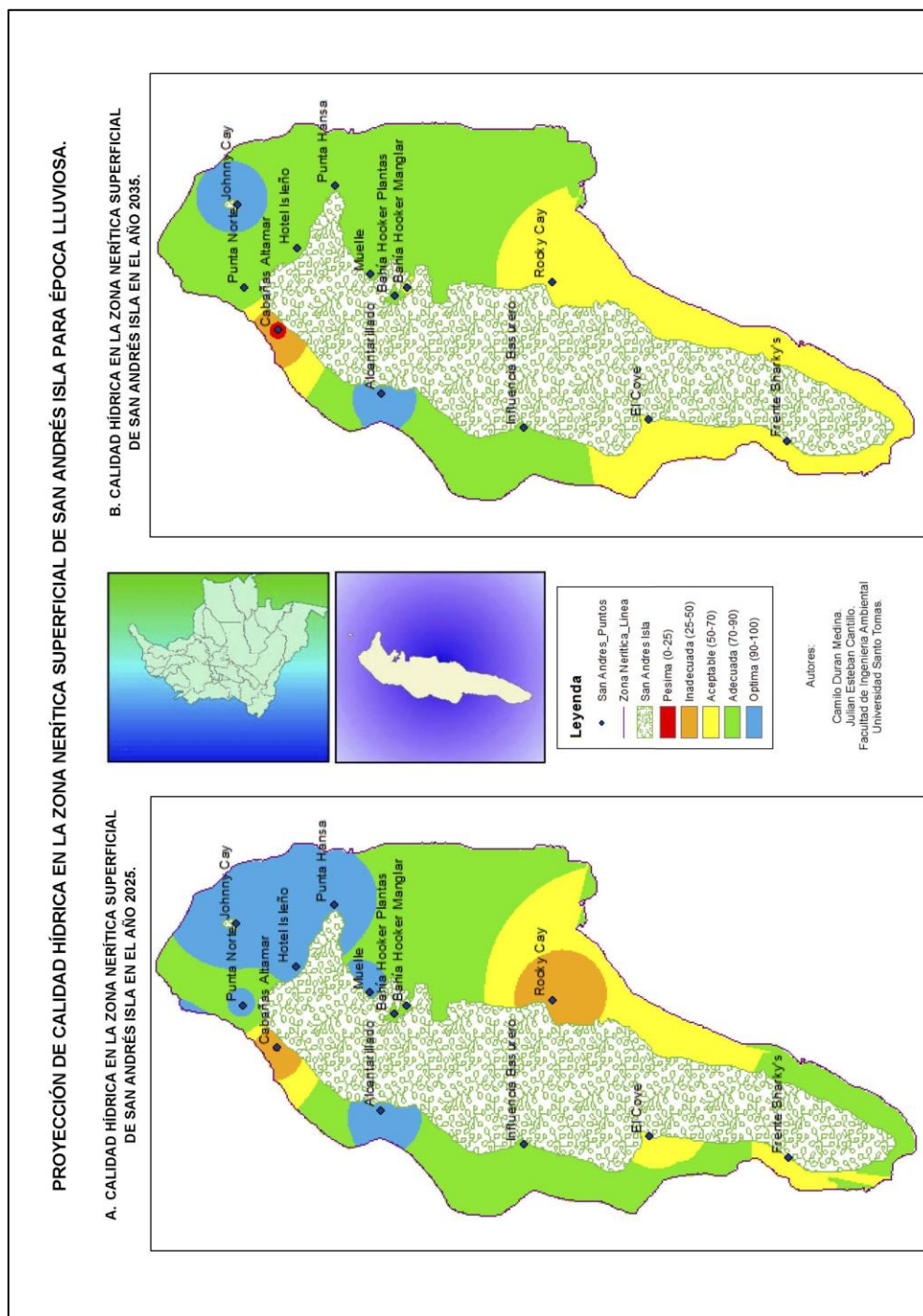
Tabla 12: Proyecciones de calidad hídrica para el año 2025 y el 2035 en cada una de las estaciones de monitoreo.

ESTACIÓN	AÑO 2025		AÑO 2035	
	LLUVIA	SECO	LLUVIA	SECO
Punta Hansa	95,27147388	93,08058008	82,91735286	93,46847538
Hotel Isleño	94,9654957	83,683	82,37915408	64,65
Punta norte	93,461	67,04752645	80,02	50,64196988
Cabañas Altamar	24,09105025	36,543	21,35535988	27,321
Alcantarillado	99,2131	98,44287873	99,2321	100,30243
El Cove	68,87913926	90,73681854	50,56487839	92,92559194
Rocky Cay	30,23890131	85,20332472	57,85	81,05737859
Bahía Hooker Manglar	77,56003485	80,40029265	63,79848966	74,77995916
Bahía Hooker Plantas	88,90847355	60,01535098	88,85589593	22,62592718
Muelle	96,7244	87,48935939	87,75	83,21287504
Johnny Cay	100	98,73560846	100	95,3704
Influencia Basurero	85,59693768	88,25227796	87,52166234	92,83268067
Frente Sharky's	69,6866861	90,13899302	60,23437114	70,00169624

Fuente: Autores.

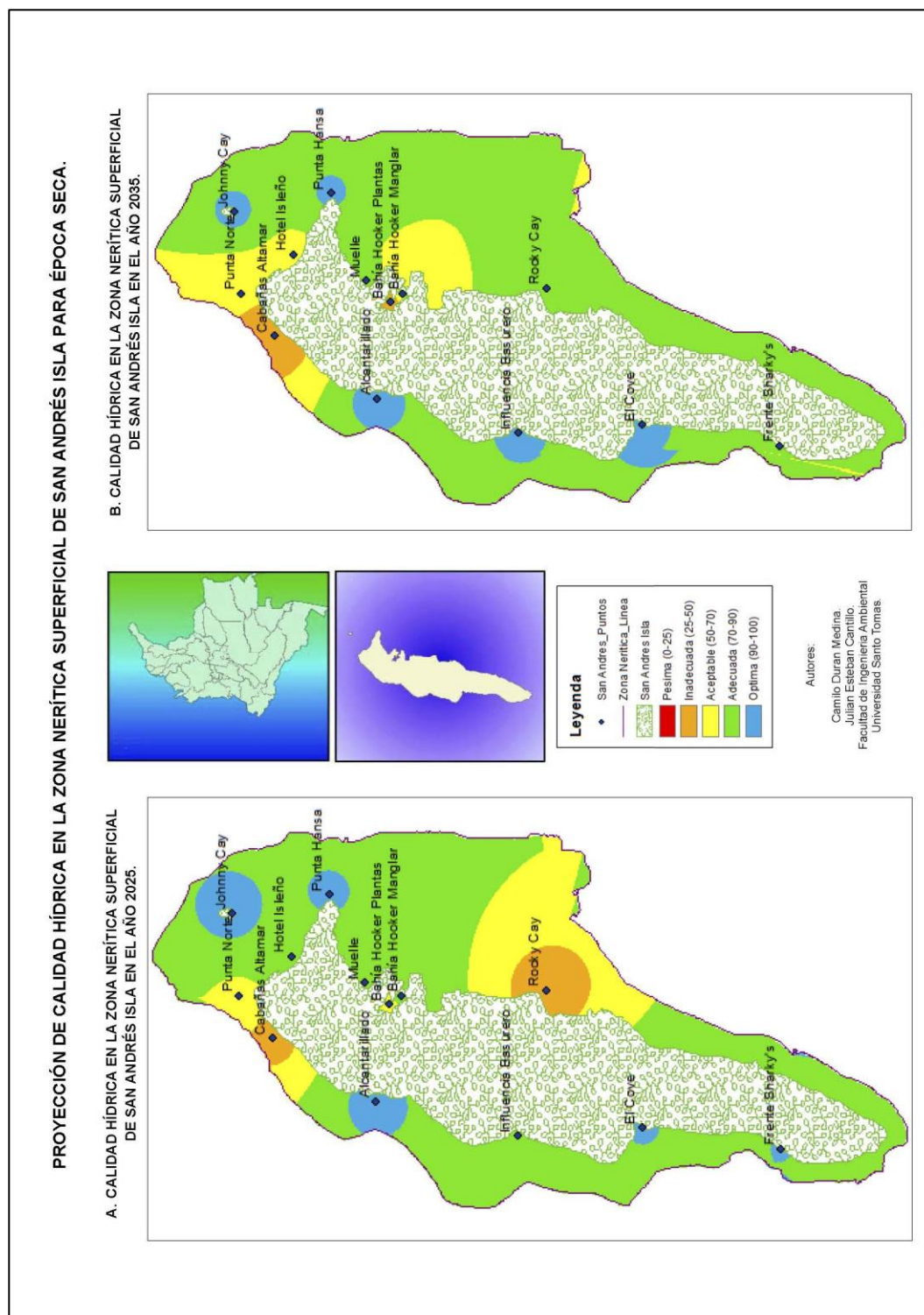
2.2.5.1. Representación gráfica de los escenarios futuros.

Ilustración 9: Escenario futuro de la calidad hídrica para época lluviosa en los años 2025 y 2035 en la zona nerítica superficial de San Andrés Isla.



Fuente: Autores.

Ilustración 10: Escenario futuro de la calidad hídrica para época seca en los años 2025 y 2035 en la zona nerítica superficial de San Andrés Isla.



Fuente: Autores.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las proyecciones para la época lluviosa en ambos años (ilustración 9), se observó que para el 2025 las estaciones con una calidad hídrica inadecuada son Cabañas Altamar y Rocky Cay, seguidas por las estaciones de El Cove y Frente Sharky's con una calidad aceptable. En comparación con el año 2035 las estaciones anteriormente nombradas mantienen su estado frente a calidad, a diferencia de Cabañas Altamar que evidencia una calidad pésima, en donde es importante resaltar que a pesar de que se observe una calidad hídrica que garantice el uso de esta, algunas estaciones como Hotel Isleño, Punta Hansa, Muelle y Punta Norte pasaron de una calidad óptima a una adecuada, lo que evidencia una disminución en esta.

Por otra parte las proyecciones obtenidas en época seca en ambos años (ilustración 10) evidencian una calidad similar a las proyecciones de la época lluviosa, esto debido a que como se mencionó en el ACP la época del año no es un factor que muestre una diferencia significativa, pero que de cierto modo si denota una variación de la calidad hídrica en algunas estaciones como: Bahía Hooker Manglar, Bahía Hooker Plantas, Frente Sharky's, El Cove y Punta Norte.

2.2.6. Planteamiento de soluciones ambientales.

En concordancia con lo anteriormente descrito y con base en el diagnóstico de la calidad hídrica realizado en la zona nerítica superficial por medio de la implementación y ejecución de herramientas estadísticas como medidas de tendencia central, análisis de regresión lineal, prueba t de Student y análisis de componentes principales para el posterior desarrollo de proyecciones de calidad hídrica en función del aumento poblacional, se proponen las siguientes soluciones ambientales que de manera complementaria con las especificadas en el PSMV de la isla garanticen que la calidad hídrica se mantenga en unos rangos aceptables para hacer un uso seguro de esta y contribuir a la protección de la fauna y flora propia del ecosistema en pro de salvaguardar la población de San Andrés y el medio que los rodea.

En primera instancia y siendo consecuente con las problemáticas ambientales generadas a partir de las aguas residuales que se presentan en San Andrés Isla, PROACTIVA Aguas del Archipiélago S.A. E.S.P., plantea proyectos y programas que mejoren en gran medida el servicio de alcantarillado sanitario. Por tal razón, la empresa pretende en primera medida ampliar la cobertura del servicio de alcantarillado por medio de un Plan Maestro de Alcantarillado como ellos lo denominan, con una inversión de \$5.767.070.949,4 millones de pesos con el fin de que en los sitios donde haya inexistencia de la red, se dejen de realizar los

vertimientos inadecuados, informales y puntuales que han traído como resultado el deterioro del ecosistema y por ende la disminución de la calidad de vida de los habitantes [38].

Como segunda medida se plantea la opción de implementar un pre-tratamiento de las aguas residuales debido a que en la actualidad estas son vertidas al mar a través del emisario submarino y un vertimiento puntual autorizado sin ningún tipo de tratamiento debido a que antes de ser dispuestas al cuerpo de agua el sistema de alcantarillado sanitario realiza únicamente un tratamiento preliminar que consiste en la separación de más del 90% de sólidos flotantes y de gran tamaño mejorando así su posterior dilución, lo que no garantiza una calidad óptima [38].

De manera complementaria se implementó un Plan de Seguimiento, Control y Monitoreo Ambiental de acuerdo a la política de gestión ambiental de la empresa PROACTIVA Aguas del Archipiélago S.A. E.S.P., y dando cumplimiento a lo establecido por la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA) en la modificación de la licencia ambiental (resolución 423 de junio de 2007) para la construcción y operación del emisario submarino con el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento y eficiencia del mismo [38].

Este plan de monitoreo consta de realizar una visita al mes en donde se toman muestras en la estación de bombeo que se encuentra en el área de influencia del emisario submarino, es decir a nivel superficial, medio y profundo con el fin de analizar la calidad hídrica que se está obteniendo por los vertidos a partir de una caracterización de la concentraciones de metales pesados, DBO5 y calidad bacteriológica en la descarga y el cuerpo receptor, y por ultimo sobre os parámetros fisicoquímicos y microbiológicos [38].

Como última medida propuesta se tiene una educación a la comunidad, buscando por medio de trabajadoras sociales desarrollar una concientización por una metodología puerta a puerta de los beneficios obtenidos al vincularse a la red de alcantarillado. En donde [38]:

- A nivel de saneamiento ambiental básico, se garantiza la minimización de enfermedades producidas por contaminación, eliminación de vectores y eliminación de malos olores.
- Con el sellamiento de pozos sépticos, no habrá contaminación del subsuelo y de los acuíferos por filtraciones existentes.
- Disminución de la contaminación del medio ambiente.

- El sistema de alcantarillado se hará cargo de las descargas de agua residual de cada una de las viviendas, por tal razón esta deberá hacerse cargo de la operación y mantenimiento periódico de las redes principales garantizando la correcta evacuación del caudal vertido.
- Se realiza un costo–beneficio del servicio de la empresa prestadora en comparación con el uso de carro-tanque.

En conjunto se darán a conocer los datos de la obra en general como costos de la obra, formas de pago y la descripción propia del trabajo a realizar por el contratista. En dichas visitas se diligencia un formato que evidencia la aceptación o no del usuario en cuanto a la conexión al sistema de alcantarillado [38].

De forma complementaria una posible medida preventiva que permite la efectividad de posteriores soluciones a la problemática ambiental identificada es la regulación de los vertimientos puntuales que se realizan informalmente. Esto debido a que al no recibir un tratamiento preliminar, poseen unas altas cargas contaminantes que afectan significativamente la calidad hídrica en la zona marino-costera especialmente la zona circundante al territorio y por lo tanto se requiere de estrategias de educación y concientización ambiental para evitar dichos vertimientos puntuales y garantizar que la mayoría de las aguas residuales sean transportados por la red de alcantarillado o dispuestos en los pozos sépticos.

En cuanto a la ampliación de la red de alcantarillado que permitiría mayor conexión de la población a esta y a su vez el desmantelamiento de un porcentaje de los pozos sépticos que actualmente representan el 90% de la disposición de las aguas residuales y que resultan ser un factor de aporte en el deterioro de la calidad hídrica debido a que en su mayoría no cuentan con las reglamentaciones de diseño y construcción sugeridas por el RAS 2000 título E sobre el tratamiento de aguas residuales municipales [55], presentando infiltraciones que afectan el recurso hídrico [41].

Por lo tanto es importante considerar que dichos tanques deben ser adecuados para evitar la entrada de aguas lluvias y a su vez la infiltración de aguas residuales. A su vez de forma complementaria las aguas residuales dispuestas en los tanques deben recibir un tratamiento que mejore la calidad del vertimiento por medio de la remoción periódica de los sedimentos a cargo de un personal capacitado que disponga de los equipos de protección personal adecuados para evitar el contacto entre él y el lodo. Además por ningún motivo el lodo removido debe ser dispuesto en el mar y se debe garantizar el adecuado tratamiento de este por medio de controles periódicos en relación con la limpieza del pozo [55].

Otra posible solución basados en las problemáticas ambientales que afectan la calidad hídrica en el sector de influencia del relleno sanitario Magic Garden se deriva de la adecuación del mismo especialmente de la piscina de lixiviados ya que según la defensoría del pueblo, actualmente esta no cuenta con las condiciones adecuadas para la recirculación del lixiviado y que adicionalmente no hay evidencia de canales de recolección ni su bombeo sistematizado lo que genera infiltración de los mismos para llegar a la zona marítimo-costera [41]. Por lo tanto los autores proponen realizar la readecuación del sistema de manejo y tratamiento de lixiviados con base en los propuesto por el RAS 2000 título F [56].

En consecuencia las medidas planteadas anteriormente y que podrían contribuir a que la calidad hídrica no se vea afectada se podrían diseñar, construir y operar una vez se tenga un diagnostico que muestre la necesidad de su implementación. Por lo tanto el aporte del presente proyecto hace referencia a una metodología que permite analizar y diagnosticar de forma cuantitativa y cualitativa la calidad del agua en la zona nerítica superficial con base en las condiciones que esta ha venido presentando a lo largo del tiempo, la cual fue adaptada a las condiciones del aumento poblacional y al poco número de medición de parámetros físicos, químicos y biológicos, para que así CORALINA cuente con una herramienta propia que fortalezca los métodos de análisis y evaluación con base en la implementación de la metodología del presente proyecto que es un insumo para garantizar que las condiciones de calidad hídrica permitan su uso recreativo y de preservación de flora y fauna.

3. CONCLUSIONES.

- En comparación con los límites permisibles de calidad hídrica según el uso recreativo de contacto primario y secundario y de preservación de flora y fauna establecidos en el decreto 1076 de 2015 capítulo 3, de manera general se logra evidenciar que en la mayoría de observaciones por año las concentraciones registradas se encuentran dentro de los límites permisibles, exceptuando ciertos valores que superan la normatividad pero de igual forma no son significativos para determinar problemas de contaminación, esto debido a que el monitoreo realizado no permite una caracterización de la tendencia de los parámetros por su baja frecuencia de muestreo. Por lo tanto, de forma inicial se observa que los parámetros SST, DBO, pH y OD no presentan gran cantidad de valores atípicos que superen los límites permisible, a diferencia de los dos parámetros microbiológicos (CTT, CFS) que como se mencionó anteriormente deben ser analizados de forma individual por la alta presencia de valores atípicos que superan en gran proporción los límites establecidos por la normatividad legal vigente para Colombia.
- En cuanto a la aplicación del ICAM se logró determinar que la mayoría de estaciones de monitoreo presentes en San Andrés Isla, registraron una calidad hídrica que varía de aceptable a optima y por lo tanto según el instituto de investigación marino costeras “Jose Benito Vives de Andreis” no requiere de alguna restricción de uso ya que brinda las condiciones adecuadas para la preservación de flora y fauna y el uso recreativo, con excepción de 2 estaciones (Bahía Hooker Manglar y Bahía Hooker Plantas) que al registrar una calidad inadecuada son aguas que requieren muchas restricciones de uso para ambas épocas del año.
- Al realizar el análisis de regresión lineal múltiple para cada una de las estaciones en relación con las dos épocas del año, se logró desarrollar una serie de ecuaciones que en función del comportamiento de los parámetros desde el año 1998 hasta el año 2015-I permiten predecir los posibles valores futuros de calidad hídrica para la zona nerítica superficial, teniendo en cuenta que el ajuste de las 26 ecuaciones fue en todos los casos mayor al 95%, y por lo tanto estas si pueden ser utilizadas como una herramienta de análisis en la Isla o el punto de partida para el desarrollo de futuros escenarios que permitan actuar de forma de preventiva y/o regulatoria.
- Considerando la comparación entre los resultados obtenidos por la aplicación del ICAM con el 30% de las observaciones restantes de la base

de datos y el uso de este mismo porcentaje en las ecuaciones de regresión lineal múltiple generadas por los autores, se logra afirmar que no hay una diferencia entre los resultados obtenidos por medio de la aplicación de la prueba estadística t de Student, la cual refleja que no existe una diferencia significativa entre las variables pareadas por época. Sin embargo las ecuaciones de regresión lineal planteadas por los autores tienen un mayor ajuste a los datos y los parámetros establecidos que presentan la mayor cantidad de datos en las series de tiempo y por ende estas brindarían una mayor fiabilidad al momento de evaluar la calidad hídrica alrededor de las 13 estaciones de monitoreo.

- Al relacionar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con la población y los resultados obtenidos en el ICAM por medio del ACP se logró evidenciar que en primera medida las observaciones por parámetros no se relacionan en gran magnitud con la población y por lo tanto en términos de calidad hídrica se evidencia que a medida que ha aumentado la población de San Andrés Isla esta ha mantenido unas condiciones óptimas. De igual forma también se evidencia una relación directa entre el aumento o disminución de las concentraciones de los parámetros con el ICAM y permite afirmar que sólo son pocas las estaciones con una calidad inadecuada y que no existe una diferencia significativa entre la calidad hídrica y la época de estudio, aunque para fines prácticos se haya considerado y realizado el estudio de forma diferencial para época lluviosa y para época seca.
- A pesar de que el aumento poblacional no se vea reflejado en la disminución de la calidad hídrica este es un factor de importante consideración al momento de analizar las observaciones de los parámetros CFS y CTT de forma individual. Ya que estas dos variables tienen una alta presencia de valores atípicos que superan la normatividad actual vigente y por lo tanto podrían llegar a afectar las condiciones adecuadas de calidad para el uso del agua oceánica de contacto primario y secundario. De igual forma es importante mencionar que algunas estaciones como Bahía Hooker Manglar y Plantas cuya calidad no es adecuada se ven afectadas debido a sus condiciones ecológicas por la presencia de ecosistemas de manglar y las sus condiciones hidrodinámicas que no permiten un mayor flujo de las corrientes en esta zona y contribuyen a que los vertimientos no solo de origen doméstico sino también de origen agrícola que estén llegando a estas mantengan sus concentraciones allí.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en las proyecciones de calidad hídrica para los años 2025 y 2035 en ambas épocas, se logró observar que

a pesar de presentarse una calidad pésima para el año 2035 en la estación Cabañas Altamar, las demás estaciones en su mayoría evidencian una mejora de esta en concordancia con la tendencia de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en relación con el aumento poblacional. Esto posiblemente debido a que el histórico de datos refleja que desde el año 1998 hasta el 2014 la calidad ha mejorado y por lo tanto al considerar únicamente la población como un factor de incidencia en esta, los escenarios generados muestran dicha mejora sin incluir las demás variables que podrían llegar a influir en una disminución de la calidad hídrica en la zona y por ende estos escenarios resultan ser una visión general de lo que se podría llegar a presentar en un futuro.

- A pesar de que se puedan plantear diversas soluciones ambientales que contribuyan a mejorar y conservar la calidad hídrica de la isla, es importante considerar factores culturales que dificultan el correcto desempeño de dichas soluciones, ya que la mayoría de los vertimientos se realizan por parte de la comunidad no conectada a la red de alcantarillado y que de igual forma no tienen conocimiento o no le dan la relevancia necesaria a las repercusiones que pueden traer sobre el ecosistema dichas acciones. Por lo tanto, aunque las soluciones planteadas en el presente proyecto se enfoquen a la parte ingenieril se podrían desarrollar medidas sociales que se enfaticen en futuros proyectos y que logren complementar las partes culturales de la isla con las necesidades estructurales de la misma.

4. RECOMENDACIONES.

- Debido a que la principal dificultad al momento de ejecutar el presente proyecto fue la cantidad de observaciones por parámetro en un año, se recomienda a CORALINA aumentar la frecuencia de muestreos teniendo en cuenta la guía de la EPA que sugiere realizar un muestreo trimestral [57] para lograr así una mayor robustez en los datos y garantizar una mayor caracterización de la zona de estudio en cuanto a la calidad hídrica y su diagnóstico.
- De igual forma otro factor a considerar para lograr un mayor ajuste de las ecuaciones de regresión lineal a las condiciones de la isla y por ende una mayor veracidad al momento de la formulación y análisis de los escenarios futuros, es la implementación de un método que permita calcular de forma más precisa la relación que tienen cada una de las concentraciones por parámetro (físico, químico y/o biológico) y la población. Esto en relación con el aumento de la tasa poblacional flotante y no flotante que se ha evidenciado a lo largo del tiempo.
- Teniendo como premisa que los escenarios futuros del presente proyecto están enfocados únicamente al aumento poblacional, estos podrían ser complementados con la inclusión del aporte de carga contaminante por parte de las actividades agrícolas y pecuarias que actualmente se desarrollan en la isla y que posiblemente no cuentan con un control y seguimiento de los residuos generados por estas.
- Teniendo como punto de partida que el presente proyecto es un insumo inicial para lograr un diagnóstico más preciso de la calidad hídrica en la zona nerítica superficial, este podría tener continuidad por medio de la implementación de modelos que integren no solo las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, sino las condiciones hidrodinámicas que posiblemente podrían variar los resultados obtenidos en las mediciones, pero que no fueron consideradas en la ejecución de este ya que de forma inicial se planteó la zona de estudio en un estado estacionario.

5. OBSERVACIONES.

- Teniendo en cuenta que el estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia sede Caribe se enfoca en un diagnóstico de calidad hídrica por medio de índices, es importante considerar los resultados obtenidos en este y compararlos con los resultados suministrados en el presente proyecto.
- En cuanto al análisis de regresión lineal ejecutado en el presente proyecto es importante considerar que debido a la cantidad de datos era insuficiente es importante considerar otros factores o métodos que permitan lograr un mayor ajuste y veracidad de los resultados.
- De igual forma la validación realizada por la prueba estadística t de Student debe ser reconfirmada para verificar que no existan problemas en cuanto a los resultados obtenidos y que esta permita realmente validar la ausencia de diferencias en cuanto a las dos variables estudiadas (ICAM y ARL).
- En referencia a los resultados obtenidos de calidad hídrica es importante mencionar que se deben considerar de forma separada las condiciones naturales de las condiciones antrópicas que pueden llegar afectar a esta y por lo tanto se recomienda hacer mediciones de otros parámetros que se generen directamente de fuentes antrópicas y no naturales.
- De igual forma se recomienda el seguimiento del presente proyecto por medio de la ampliación y ejecución de las soluciones ambientales anteriormente planteadas para garantizar su correcta efectividad al momento de ser desarrolladas.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] A. Londoño Carvajal, G. I. GiraldoGomez y A. A. Gutierrez Gallego, «Metodos analiticos para la evaluacion de la calidad fisicoquimica del agua,» Manizales, Colombia, 2010.
- [2] J. L. Valencia Delfa, «Estudio estadistico de la calidad de las aguas en la cuenca hidrografica del rio Ebro.,» Madrid, España, 2007.
- [3] United States Environmental Protection Agency, "United States Environmental Protection Agency.," 16 Mayo 2014. [Online]. Available: <http://water.epa.gov/scitech/datait/models/>. [Accessed 14 Octubre 2015].
- [4] W. Thoe, M. Gold, A. Griesbach, M. Grimmer, M. L. Taggart y A. B. Boehm, «Predicting water quality at Santa Monica Beach: Evaluation of five different models for public notification of unsafe swimming conditions.,» *Water research*, vol. 67, nº 105-117, pp. 105-117, 2014.
- [5] United States Environmental Protection Agency, «Virtual Beach (VB).,» United States of America, 2014.
- [6] European Commission, "Integrated coastal zone mangement in Spain.,» España, 2015.
- [7] Australian Institute of Marine Science, "Water quality.,» Australia, 2015.
- [8] National Research Infrastructure for Autralia, «Integrated Marine Observing System.,» Australian Government, 2011. [En línea]. Available: <http://imos.org.au/anmnrs.html>. [Último acceso: 14 Octubre 2015].
- [9] Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial, «Politica Nacional para la Gestion Integral del Recurso Hidrico.,» Bogota D.C., 2010.
- [10] Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives de Andreis", «Informe de actividades 2012.,» Santa marta, Colombia, 2013.
- [11] S. Palmer Cantillo, «Análisis historico (1997-2005) de la calidad de las aguas costeras en la isla de San Andres.,» San Andres Isla, 2007.

- [12] P. A. Azis Elneser, «Elementos para un plan de gestion ambiental de las aguas costeras en San Andres Isla.,» San Andres Isla y Bogota D.C., 2012.
- [13] A. Abello Vives y J. Marie Mow, «San Andres, nuestra ciudad insular.,» *Credencial Historica*, nº 228, 2008.
- [14] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, «Informacion departamental: San Andres y Providencia.,» San Andres y Providencia, Colombia, 2005.
- [15] Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives De Andreis" y Corporacion para el Desarrollo Sostenible del Archipielago de San Andres, Providencia y Santa Caralina., «Atlas de la Reserva de Biosfera SeaFlower.,» Archipielago de San Andres, Providencia y Santa Catalina, 2012.
- [16] Red de vigilancia para la conservacion y proteccion de las aguas marinas y costeras de Colombia- REDCAM, «Diagnostico y evaluacion de la calidad de las aguas marinas y costeras del caribe y el pacifico Colombianos informe tecnico 2013.,» Santa Marta, Colombia, 2013.
- [17] Intergovernmental Oceanographic Commission, «A handbook for measuring the progress and outcomes of integrated coastal and ocean management.,» UNESCO, Paris, 2006.
- [18] P. Bosch, B. Gee y D. Gee, «Environmental indicators: Typology and overview.,» European Environmental Agency, Copenhagen, 2013.
- [19] GESAMP, «Regional Seas Report and Studies No. 115.,» UNEP, London, United Kingdom, 2001.
- [20] Universidad de Pamplona, «Indicadores de la calidad del agua: generalidades.,» Pamplona, España, 2013.
- [21] Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives de Andreis", «Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMpff). Indicadores de monitoreo biologico del Subsistema de Areas Marinas Protegidas (SAMP),» *Vivas-Aguas*, Vols. %1 de %29781-958-8448-73-2, nº 69, p. 32, 2014.
- [22] Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives de

Andreis", «Proyecto Indicadores de Linea Base, Protocolos de Monitoreo.,» Santa Marta, Colombia, 2011.

- [23] P. J. Brockwell y R. A. Davis, Introduction to Time Series and Forecasting, Secod Edition., New York: Springer, 2002.
- [24] C. W. Guerra, A. Cabrera y L. Fernandez, «Criterios para la seleccion de modelos estadisticos en la investigacion cientifica.,» *Revista Cubana de Ciencia Agricola*, vol. 1, nº 37, p. 9, 2003.
- [25] D. L. Rubinfeld, «Reference Guide on Multiple Regression.,» California, United States of America, 2015.
- [26] J. de la Horra, «Modelo de regresión múltiple,» Madrid, España.
- [27] J. H. Steiger, «The t Distribution and its Aplications.,» Department of Psychology and Human Development, Vanderbit University, Nashville, United States of America.
- [28] L. I. Smith, «A tutorial on Principal Components Analysis,» United States of America, 2002.
- [29] C. Lozares Colina y P. Lopez Roldan, «El analisis de componentes principales: aplicacion al analisis de datos secundarios.,» Barcelona, España.
- [30] IBM, «Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS statistics 21.,» Estados Unidos de America, 2012.
- [31] R Development Core Team, «Introduccion a R.,» 2000.
- [32] B. Booth y A. Mitchell, Getting Started with ArcGis, United States of America: ESRI, 2001.
- [33] Corporacion para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andres, Providencia y Santa Catalina, «CORALINA,» Febrero 2015. [En línea]. Available: <http://www.coralina.gov.co/>. [Último acceso: Febrero 2015].
- [34] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible., «Decreto 1076 del 2015,» Bogota D.C. , 2015.

- [35] M. Hernandez Lopez, «Evaluacion de la incertidumbre de los parametros y su efecto sobre la incertidumbre predictiva de un modelo hidrológico distribuido, mediante un algoritmo Markv Chain Monte Carlos de tipo adaptativo.,» Departamento de Ingenieria Hidraulica y Medio Ambiente, Universitat Politecnica de Valencia, Valencia, España, 2012.
- [36] L. Lopez Martinez, A. Paredes Gimenez y N. Alcaraz Oliver, «Análisis de parametros físicos, químicos y biológicos en las aguas costeras de la region de Murcia.,» Grupo Investigacion "Ecosistemas", Universidad Politecnica de Cartagena, Cartagena.
- [37] N. J. Salkind, Métodos de investigación., Mexico: Prentice Hall, 1999.
- [38] PROACTIVA Aguas del Archipiélago S.A. E.S.P., «Plan de saneamiento y manejo de vertimientos para la isla de San Andrés,» San Andrés Isla, Colombia, 2008.
- [39] Consejo de las comunidades europeas, «Directiva 91/271/CEE,» Barcelona, España., 1991.
- [40] Presidencia de la Republica de Colombia., «Decreto 510 de 2015,» Archipelado de San Andres, Providencia y Santa Catalina, Colombia., 2015.
- [41] Defensoria del Pueblo de Colombia, «Prestacion de los servicios publicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo, en el Archipelado de San Andres, Providencia y Santa Catalina.,» Archipelado de San Andres, Providencia y Santa Catalina, Colombia., 2015.
- [42] J. A. Garay y A. M. Velez G, «Contaminacion marino-costera en Colombia,» Bogota D.C, Colombia., 2001.
- [43] ELINSUBCA Ingenieria, «Emisario Submarino Isla de San Andrés, Colombia,» San Andrés Isla, Colombia, 2007.
- [44] G. Goyenola, «Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuaticos,» 2014.
- [45] California Environmental Protection Agency, «Folleto Informativo Oxigeno Disuelto,» California, EEUU, 2015.

- [46] J. P. Parra y L. F. Espinosa, «Acumulacion de Pb, Cd y Zn en sedimentos asociados a Rhizophora mangle, en el rio Sevilla Cienaga Grande de Santa Marta, Colombia,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencia*, vol. XXXI, nº 120, pp. 357-364, 2007.
- [47] D. J. Randall, W. L. Poon, C. Y. Hungy y T. K. Tsui, «Fish physiology, toxicology and water quality. Proceedings of the Ninth International Symposium,» *Ecosystems Research Division*, vol. 600, nº 07/010, p. 260, 2006.
- [48] Instituto Colombiano de Desarrollo Rural (Incoder), «Bosque de Manglar: Un ecosistema que debemos cuidar,» Universidad de Bogota Jorge Tadeo Lozano, Bogota D.C. .
- [49] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolucion 631,» Bogota D.C., 2015.
- [50] A. Amaya y J. Murillo, «Monitoreo sistematico de las aguas marino-costeras del Archipielago de San Andres, Providencia y Santa Catalina,» Informe tecnico CORALINA, San Andres Isla, Colombia, 2006.
- [51] W. Brooks, S. Corsi, M. Fienen y R. Carvin, «Predicting recreational water quality advisories: A comparison of statistical methods.,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 76, pp. 81-94, 2016.
- [52] G. Calvo Benes y J. Mora Molina, «Evaluacion y clasificacion preliminar de la calidad del agua de las cuencas de los rios Tarcoles y Reventazon,» *Tecnologia en Marcha*, vol. 22, nº 1, pp. 57-64, 2009.
- [53] E. Martinez Rodriguez, «Errores frecuentes en la interpretacion del coeficiente de determinacion lineal.,» *Anuario Juridico y Economico Escurialense*, p. 16, 2005.
- [54] J. M. Arranz y M. M. Zamora, «Analisis de Autocorrelacion.,» Zaragoza, España.
- [55] Direccion de Agua Potable y Saneamiento Basico, «Reglamento tecnico del sector de agua potable y saneamiento basico RAS-200,» 2000.
- [56] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Reglamento tecnico del sector de

agua potable y saneamiento basico,» 2012.

- [57] Environmental Protection Agency, «Recommended guidelines for sampling marine sediment water column, and tissue in puget sound.,» Washington, 1997.

ANEXO 1.

CORALINA
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago
de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

San Andrés Isla, 28 de Agosto de 2015

Doctor
DUVAN JAVIER MESA FERNÁNDEZ
Decano Facultad de Ingeniería Ambiental
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
Tel: 5878797 EXT. 1571
SEDE PRINCIPAL CARRERA 9 No. 51-11
Bogotá

CORALINA 28/08/2015 10:38
Al Contestar con este No.: 20152501714
Origen: SUBDIRECCIÓN DE GESTIÓN A
Destino: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
Anexo: Folio 1

Ref. Resultados de Monitoreo Marino Costero

En respuesta a su solicitud, nos permitimos informar que la Corporación cuenta con una Red de Monitoreo de la Calidad de Agua Marino Costero para San Andrés y Providencia, esta red realiza dos monitoreos al año correspondientes a la época seca y época lluviosa.

En atención a su necesidad se estará enviando vía e-mail consolidado de los resultados de las estaciones de monitoreo para el periodo 1995 – 2014, a la dirección proporcionada por el estudiante Camilo Durán.

Adicionalmente se recomienda revisar los informes técnicos de la Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM y el sistema de estadísticas REDCAM.

Se recuerda y se solicita comedidamente tener en consideración el reconocimiento de CORALINA como entidad de apoyo y suministro de información, así como del equipo técnico que está en función de apoyo al estudiante en todos los documentos derivados del apoyo entre ambas entidades.

Cordialmente,


OPAL MARCELA BENT ZAPATA
Subdirectora de Gestión Ambiental

Requerida a: Refutación No. 25/15101941 del 29/07/2015
Elaboró: Nathalia Monsalve

PE-08-P20, Versión 04
Fecha: 05-12-2013

San Andrés: Vía San Luis, Bgta. Km 20
Comunidades: (57 8) 513 1130 Fax: Ext 100 Línea Verde: (57 8) 512 6272
Providencia: Sector Mountain. Teléfono: (57 8) 514 6562
www.coralina.gov.co
Email: servicioalcliente@coralina.gov.co
Twitter: @coralina_sai
Facebook: Coralina y la Reserva de Muestreo Seolfover

¡Un Archipiélago posible!

Pag. 1 de 1 Rev. 2010/01/14

ANEXO 2.

Ecuaciones de Regresión Lineal Múltiple por estación.

Punta Hansa.

Lluvia

$$ICAM = 57,055 - (0,326 * OD) - (0,736 * SST) + (5,464 * PH) + (0,578 * DBO) - (0,051 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 83,262 - (2,139 * OD) - (0,68 * SST) + (3,602 * PH) - (0,022 * CFS) - (0,005 * CTT)$$

Hotel Isleño.

Lluvia

$$ICAM = 205,82 - (0,196 * OD) - (0,895 * SST) - (12,435 * PH) - (0,857 * DBO) - (0,043 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 48,604 - (1,12 * OD) - (0,863 * SST) + (6,706 * PH) + (7,912 * DBO) - (0,05 * CFS) - (0,01 * CTT)$$

Punta Norte.

Lluvia

$$ICAM = 66,06 + (0,77 * OD) - (0,674 * SST) + (2,95 * PH) + (4,799 * DBO) - (0,019 * CFS)$$

Seca

$$ICAM = 265,63 - (1,189 * OD) - (0,559 * SST) - (19,09 * PH) - (7,147 * DBO) - (0,009 * CFS)$$

Cabañas Altamar.

Lluvia

$$ICAM = 48,47 - (10,361 * OD) - (0,645 * SST) + (6,34 * PH) + (1,404 * DBO) - (0,46 * CFS) - (0,004 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 56,445 - (2,203 * OD) - (0,821 * SST) + (6,795 * PH) + (5,788 * DBO) - (0,071 * CFS) - (0,004 * CTT)$$

Alcantarillado.

Lluvia

$$ICAM = 483,241 - (3,691 * OD) - (0,416 * SST) - (40,357 * PH) - (35,97 * DBO) - (0,0004 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 162,734 - (11,68 * OD) - (0,565 * SST) + (1,239 * PH) - (1,76 * DBO) + (0,002 * CFS) - (0,01 * CTT)$$

El Cove.

Lluvia

$$ICAM = 114,412 + (2,232 * OD) - (0,64 * SST) - (3,261 * PH) - (6,5 * DBO) - (0,006 * CFS)$$

Seca

$$ICAM = 89,303 - (0,537 * OD) - (0,902 * SST) + (1,51 * PH) + (0,735 * DBO) - (0,037 * CFS) - (0,002 * CTT)$$

Rocky Cay.

Lluvia

$$ICAM = 104,334 - (1,718 * OD) - (0,289 * SST) + (1,181 * DBO) + (0,363 * CFS) - (0,029 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 136,655 - (0,845 * OD) - (0,653 * SST) - (3,763 * PH) - (1,401 * DBO) - (0,044 * CFS) - (0,005 * CTT)$$

Bahía Hooker Manglar.

Lluvia

$$ICAM = 46,65 - (2,52 * OD) - (0,241 * SST) + (8,978 * PH) - (5,102 * DBO) - (0,014 * CFS) - (0,005 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 240,421 + (0,057 * OD) - (0,792 * SST) - (18,009 * PH) - (2,268 * DBO) - (0,014 * CFS) - (0,005 * CTT)$$

Bahía Hooker Plantas.

Lluvia

$$ICAM = 499,914 + (2,644 * OD) - (0,95 * SST) - (352,07 * PH) - (10,204 * DBO) \\ - (0,015 * CFS) - (0,007 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = -329,725 - (0,448 * OD) - (0,05 * SST) + (355,612 * PH) - (12,256 * DBO) \\ - (0,007 * CFS) - (0,003 * CTT)$$

Muelle.

Lluvia

$$ICAM = 164,208 - (1,598 * OD) - (0,52 * SST) - (6,529 * PH) - (3,368 * DBO) + (0,037 * CFS) \\ - (0,006 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 94,863 + (1,416 * OD) - (0,516 * SST) - (0,656 * PH) - (1,013 * DBO) - (0,017 * CFS) \\ - (0,003 * CTT)$$

Johnny Cay

Lluvia

$$ICAM = -7042,97 + (62,21 * OD) + (01,499 * SST) + (826,584 * PH) - (34,934 * DBO) \\ - (0,008 * CFS)$$

Seca

$$ICAM = -79,236 - (0,054 * OD) - (0,565 * SST) + (21,282 * PH) + (3,185 * DBO) \\ - (0,015 * CFS) - (0,003 * CTT)$$

Influencia Basurero

Lluvia

$$ICAM = 154,104 - (2,756 * OD) - (0,765 * SST) - (4,234 * PH) - (0,866 * DBO) \\ - (0,075 * CFS) + (0,007 * CTT)$$

Seca

$$ICAM = 76,575 - (0,624 * SST) + (2,718 * PH) + (0,537 * DBO) - (0,059 * CFS) - (0,012 \\ * CTT)$$

Frente Sharky's

Lluvia

$$ICAM = 46,563 - (0,305 * OD) - (0,423 * SST) + (6,912 * PH) - (3,155 * DBO) - (0,092 * CFS)$$

Seca

$$ICAM = 237,249 - (1,085 * OD) - (0,577 * SST) - (15,726 * PH) - (2,41 * DBO) \\ + (0,003 * CFS) - (0,057 * CTT)$$