http://www.educacioneningenieria.org

Regresión lineal múltiple como herramienta complementaria del ICAM para análisis predictivo de la calidad hídrica en la zona nerítica superficial de San Andrés Isla, Colombia

Oscar Julián Esteban-Cantillo [a], Camilo Andrés Durán-Medina [a], Ángela María Jaramillo-Londoño [a] & José Luis Díaz-Arévalo [b]

[a] Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
[b] Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
oscar.esteban@usantotomas.edu.co, camiloduran@usantotomas.edu.co, angelajaramillo@usantotomas.edu.co, jodiazar@unal.edu.co

Resumen— Se analizaron datos históricos de la calidad hídrica de la zona nerítica superficial de la isla de San Andrés y se propone un método estadístico de análisis complementario del ICAM (Indicador de la Calidad de Agua Marina y Estuarina), que facilita la creación de escenarios futuros para el diagnóstico de la calidad del agua. Se determinó que la mayoría de las estaciones de monitoreo de San Andrés Isla registran una calidad hídrica que varía de aceptable a óptima, con excepción de dos con calidad inadecuada. Se proponen una serie de ecuaciones que, en función del comportamiento de los parámetros desde el año 1998 hasta el año 2014, permiten predecir los posibles valores futuros de calidad hídrica para la zona nerítica superficial, estas pueden ser utilizadas como herramienta de análisis o como punto de partida para el desarrollo de futuros escenarios que permitan actuar de forma de preventiva y/o regulatoria.

Palabras Clave— calidad del agua, regresión linear múltiple, ICAM, escenarios futuros, población.

Recibido: 7 de mayo de 2021. Revisado: 29 de julio de 2021. Aceptado: 30 de julio de 2021.

Multiple linear regression as complementary tool of ICAM for predictive analysis of water quality in the surface of neritic zone of San Andres Island, Colombia

Abstract— This document analyzes historical data of the water quality on the surface neritic zone of San Andrés Island and a statistical method of analysis complementary to the ICAM (Indicator of Marine and Estuarine Water Quality) is proposed, which facilitates the creation of future scenarios for the diagnosis of water quality. It was determined that most of the monitoring stations present in San Andrés Island register a water quality that varies from acceptable to optimal except for two with inadequate quality. A series of equations is proposed that, depending on the behavior of the parameters from 1998 to 2014, make it possible to predict the possible future values of water quality for the superficial neritic zone, which can be used as an analysis tool or the starting point for the development of future scenarios that allow acting in a preventive and/or regulatory way.

Keywords— water quality, multiple linear regression, ICAM, future scenarios, population.

1 Introducción

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 carga contaminante con repercusiones sobre el medio ambiente, especialmente sobre la calidad del agua de la zona nerítica superficial.

El monitoreo de la calidad del agua de mar responde a la necesidad de verificar si las características del recurso hídrico son adecuadas para determinados usos, siendo esta calidad un factor limitante de los procesos biológicos que ocurren en los organismos, poblaciones y hábitats existentes en las zonas marinas y costeras, y un determinante clave de la salubridad y viabilidad general de las comunidades bióticas en función de las características propias del ecosistema [1]. Si bien en Colombia se usan indicadores de estado que ayudan en la caracterización de la calidad de los ambientes marino - costeros como es el caso del ICAM (Indicador de la Calidad de Agua Marina y Estuarina) desarrollado por el Instituto Colombiano de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andaréis - INVEMAR [2], 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, lo que hace que sea necesario plantear una herramienta complementaria para apoyar la toma de decisiones por parte de la autoridad ambiental competente; en este caso, considerando no solo los parámetros físico-químicos y biológicos medidos por ellos, sino su relación con respecto a las variaciones poblacionales proyectadas, y otras condiciones cuya incidencia se relacionen 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.

Por lo tanto, en este trabajo se analizan los parámetros fisicoquímicos y biológicos rutinariamente recolectados por CORALINA, y se propone un método de análisis de los mismos que sea complementario del ICAM, y que facilite la creación de escenarios para el diagnóstico de la calidad del agua en la zona nerítica superficial marina de la isla para 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.

Los datos utilizados en este trabajo 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 cuales

corresponden a series de tiempo para los parámetros físico-químicos y biológicos tomados desde el año 1998 hasta el año 2014, con una temporalidad anual en dos épocas del año (seca y lluviosa) que corresponden a las dinámicas climatológicas de la isla.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

San Andrés isla forma parte del departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Colombia) y se encuentra localizada a los 12°32´ de latitud norte y los 81°43´ de longitud oeste en el suroccidente del mar Caribe. A este departamento pertenece la Reserva de la Biósfera (RB) Seaflower, una de las reservas marinas más grandes del mundo [3]. De acuerdo con [4] 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.

Tabla1
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: Adaptado de [5].

En la zona nerítica de la isla, que 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 (Fig. 1), se ubican las 13 estaciones de monitoreo de calidad hídrica consideradas en este estudio (Tabla 1).

La delimitación de la zona nerítica superficial delineada por la línea oscura se realiza con base en la isobara de los 200 metros de profundidad que indica el inicio del litoral marino. Por lo tanto, el análisis se realizará en la zona cercada por esta línea desde el inicio de la playa o bahía.

Figura 1. Delimitación de la zona nerítica superficial para San Andrés Isla y localización de las estaciones de muestreo.
Fuente: Adaptado de [5].

CORALINA realiza con una frecuencia bianual (época seca y lluviosa) el monitoreo de la calidad del agua nerítica superficial a lo largo de 13 estaciones de muestreo. Con base en los parámetros fisicoquímicos y biológicos recolectados desde el año 1998 hasta el año 2014, se diagnosticó la calidad hídrica de la zona nerítica superficial en la isla de San Andrés y se plantearon escenarios futuros basándose en la variabilidad de los parámetros respecto al aumento poblacional.

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 con el objeto de mejorar la evaluación en el análisis estadístico, por medio de la identificación de las variables que tuvieran alta colinealidad entre sí y por lo tanto, que duplicaran la información en el método de análisis estadístico, identificando así cuales de estas deben ser excluidas [6].

Previo a la aplicación del indicador ICAM, los parámetros fisicoquímicos y biológicos fueron examinados con ayuda de la estadística descriptiva, para estudiar el comportamiento de estos y su temporalidad en las dos épocas de medición, y de forma individual para cada una de las 13 estaciones de la red de monitoreo con que cuenta la isla.

Una vez realizada la exploración de los datos se aplicó el indicador ICAM el cual, está formulado a partir de una escala de cinco categorías de calidad definidas entre 0 y 100 y, permite sintetizar la información de los 12 parámetros fisicoquímicos y biológicos considerados por el mismo (oxígeno disuelto, pH,

nitritos y nitratos, ortofosfatos, salinidad, solidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días, hidrocarburos, metales pesados, coliformes fecales, coliformes totales y plaguicidas), y que atiende a dos clasificaciones de las aguas marinas y costeras según su uso, ya sea para la preservación de flora y fauna, o para uso recreativo de contacto primario y secundario [2, 7].

El indicador está conformado por dos conjuntos de variables, unas fisicoquímicas que describen la calidad del cuerpo hídrico basadas en las condiciones naturales del mismo, y otras contaminantes y microbiológicas que representan las alteraciones de dicha calidad por la intervención de las actividades humanas [2]. Para la aplicación de este indicador, el protocolo realizado por el INVEMAR en conjunto con otras entidades sugiere que el cálculo de los valores índice por parámetro se haga de acuerdo con la aplicación de las ecuaciones sugeridas en el mismo, respecto de los valores indicados para cada coeficiente.

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 los que se cuenta, se encontró que 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 cuente [8].

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 [9].

El análisis de regresión involucra el estudio de la relación entre dos variables cuantitativas 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 modelo que permita predecir el valor de una variable dependiente a partir de una o más variables independientes [9].

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 [9].

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \cdots + \beta_n X_n + u \quad (1)$$

Dónde [9]:
Yi: es la variable dependiente del modelo.
β : coeficientes del modelo.
X: variables independientes del modelo.
u : variable aleatoria error.

Los resultados obtenidos por medio de la ejecución del ICAM fueron modelados con las ecuaciones de regresión lineal múltiple, y validados con el 30% de los datos 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 permiten generar dichos escenarios que de forma gráfica, y por medio del uso de la herramienta ArcGis 10.2, evidenciar la variabilidad de la calidad hídrica con relación al 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.

Tabla 2
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: Adaptado de [10].

De acuerdo con 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 en 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 en el tipo de uso de la misma, se establecen los siguiente límites permisibles según su uso, tal y como se aprecia en la Tabla 2 [10].

3 Resultados

3.1 Análisis de las series de tiempo para el diagnóstico de la calidad del agua

El número de datos desde el año 1998 hasta el 2014 se contabilizó teniendo en cuenta las dos épocas del año y las 13 estaciones de monitoreo (Tabla 3).

Tabla 3
Registro del número de datos por estación, por época (Seca: S y Lluviosa: L) y por parámetro para San Andrés Isla

Estación	Parámetro											
	Oxígeno Disuelto (mg/L)		Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)		pH		DBO (mg O_2/L)		Coliformes Fecales UFC/100 ml		Coliformes Totales UFC/100 ml	
	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: Los Autores.

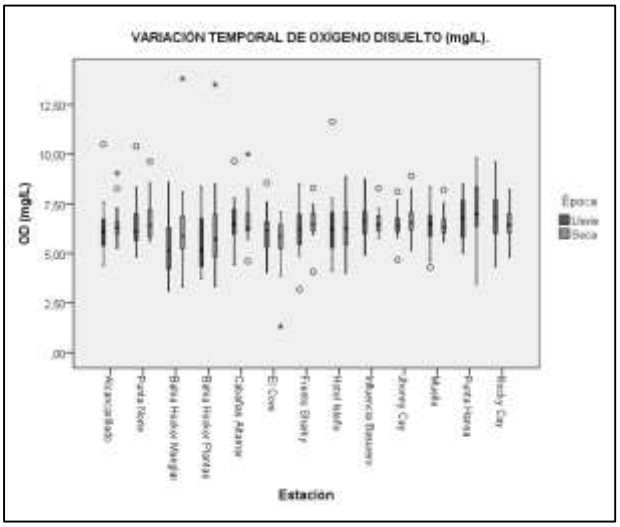
Con base en los datos suministrados por CORALINA se realizó la selección de los parámetros más relevantes respecto de las concentraciones con mayor presencia, para determinar la calidad hídrica de la zona de interés en comparación con lo exigido por el Decreto 1076 de 2015 capitulo 3 [10] en cuanto a lo que se refiere al ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos.

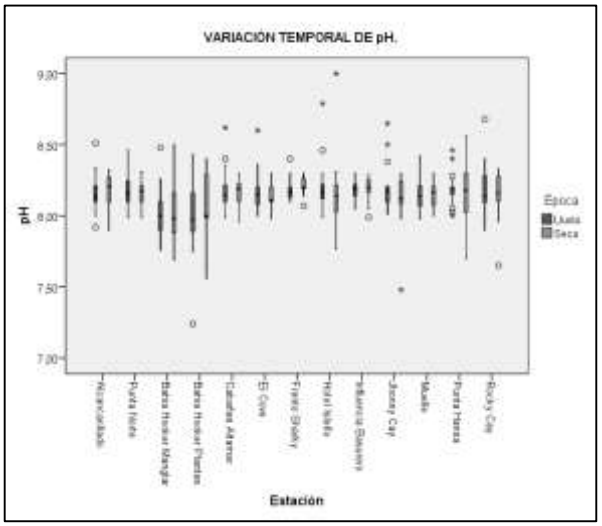
Así mismo, se aplicaron medidas de tendencia central como parte de la estadística descriptiva para determinar el comportamiento de los parámetros y su temporalidad en las dos épocas de medición (seca y lluviosa), y de forma individual para cada una de las 13 estaciones de la red de monitoreo con que cuenta la isla.

Los resultados obtenidos se muestran por medio de diagrama de cajas (Fig. 2) que permiten evidenciar la simetría de los datos, sus valores extremos y en general la variabilidad de las observaciones por parámetro a lo largo del tiempo de medición.

En cuanto a la concentración de oxígeno disuelto, se puede observar que tuvo una variación en un rango entre 4 mg/L a 8 mg/L aproximadamente, para las dos épocas del año. Las concentraciones más bajas se presentaron en época de lluvias en las estaciones de Bahía Hooker Manglar y Bahía Hooker Plantas, estas estaciones se localizan en ecosistemas de manglar, en donde son comunes las condiciones anóxicas en el sedimento de fondo.

Respecto a la distribución de los datos no es posible identificar una tendencia en las estaciones, ya que la variación de éstas para la época seca y lluviosa no muestra regularidad.





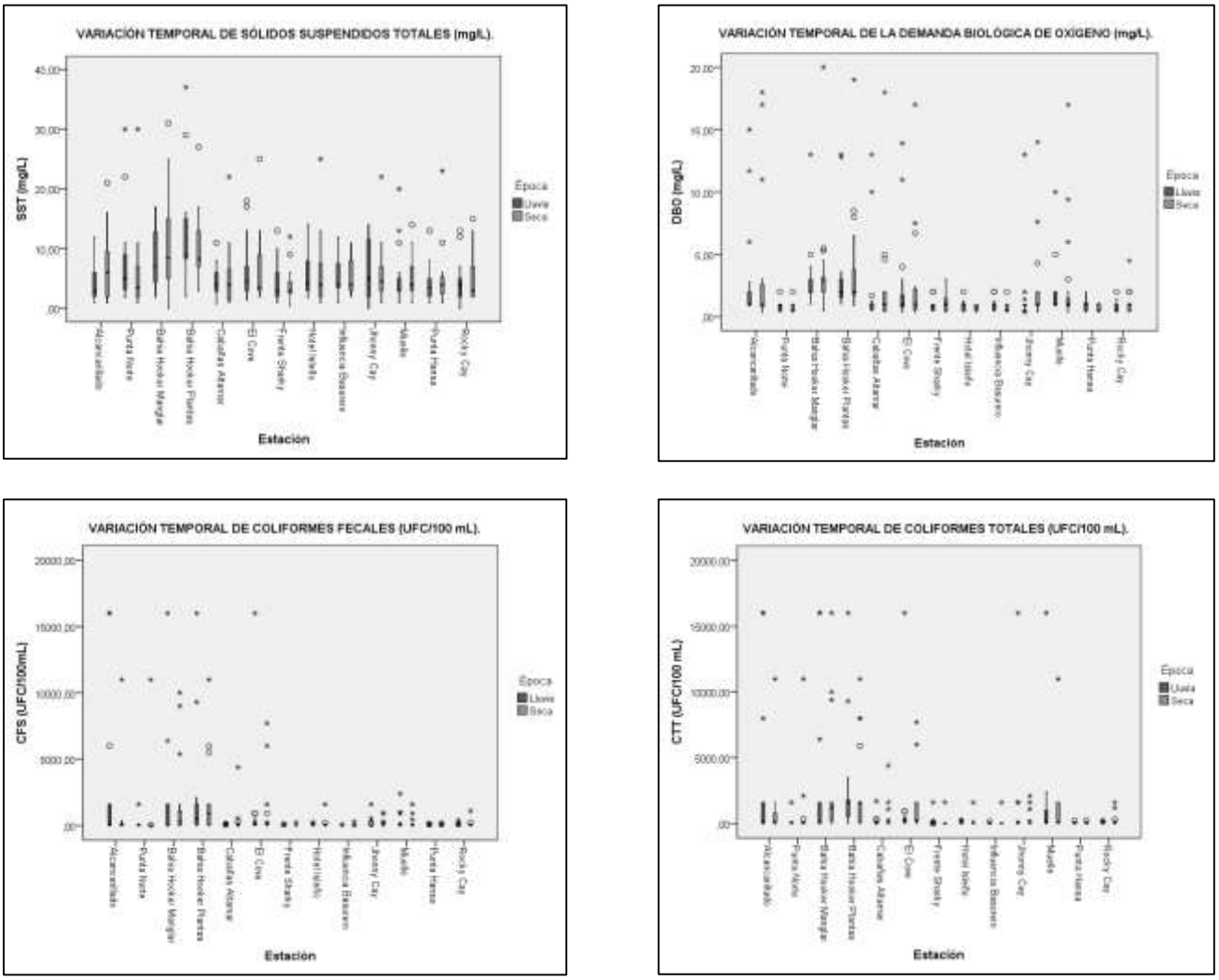


Figura 2. Variación temporal de parámetros fisicoquímicos en San Andrés Isla.
Fuente: Los autores.

En cuanto al porcentaje de saturación del oxígeno (tomando una temperatura promedio de 29°C y 1 atm de presión) se encuentra por encima del 70%, asumiendo que el 50% de los datos varía en un rango de 5,1 mg/L a 7 mg/L. En general las concentraciones registradas en época lluviosa son más bajas que en época seca ya que en esta última hay mayor influencia de los vientos alisios del norte que facilitan el intercambio de oxígeno entre el mar y la atmósfera [2].

En cuanto a los valores de pH oscilan en un rango de entre 7,8 y 8,3 lo cual es característico de las aguas oceánicas que son básicas, y pueden oscilar entre 7,2 y 9 unidades de pH.

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 en su mayoría presentaron valores elevados en época lluviosa, aun cuando se encuentran dentro de 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.

La variación de los sólidos suspendidos totales se encuentra en un rango de entre 3mg/L y 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. En cuanto al quintil 2 que representa el 50% de los datos de SST se encuentran en un rango de 3mg/L a 9mg/L aproximadamente, lo que indica que de acuerdo con la resolución 631 de 2015 que 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, San Andrés Isla cumple con esta normatividad por estar por debajo de 90 mg/L, máximo valor establecido.

Se observa una gran variabilidad en la demanda biológica de oxígeno para las dos épocas del año en todas las estaciones, debido posiblemente a la variabilidad en la presencia de materia orgánica.

En cuanto a la variación temporal de coliformes fecales no es posible encontrar una tendencia definida de las mediciones debido a su alta dispersión, además existe una alta presencia de datos atípicos con concentraciones superiores a la normatividad actual vigente ([10], 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.

En el comportamiento de los coliformes totales, se puede observar al igual que en los coliformes fecales una alta presencia de valores atípicos que de igual forma deben ser analizados de manera individual ya que la normatividad legal vigente ([10] 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 [2].

3.2 Aplicación del Índice de Calidad de Aguas Marinas (ICAM)

Para la aplicación del ICAM [7] se utilizaron 3 variables fisicoquímicas: oxígeno disuelto, pH y solidos suspendidos totales; y 3 variables contaminantes: 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 no se tuvo en cuenta 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 consideraran 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 del indicador.

Teniendo en cuenta la selección de los parámetros, 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 cumpliera con un valor igual a uno luego de realizar la sumatoria de cada parámetro para cada conjunto de variables (Tabla 4).

Tabal 4
Valores de ponderación para cada parámetro fisicoquímico o de contaminación utilizado en el ICAM

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

Fuente: Los Autores.

La ejecución de éste y el cálculo del indicador 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 el cálculo. Los resultados obtenidos se muestran en La Tabla 5.

Tabla 5
Indicador de calidad de aguas marinas (ICAM) por estación para San Andrés Isla

Estación	Época			
	Seca	Calidad	Lluviosa	Calidad
Punta Hansa	92,11	Óptima	93,17	Óptima
Hotel Isleño	88,20	Adecuada	91,66	Óptima
Punta norte	69,01	Aceptable	85,85	Adecuada
Cabañas Altamar	78,57	Adecuada	90,80	Óptima
Alcantarillado	60,58	Aceptable	53,01	Aceptable
El Cove	55,85	Aceptable	62,11	Aceptable
Rocky Cay	88,57	Adecuada	91,93	Óptima
Bahía Hooker Manglar	31,24	Inadecuada	51,47	Aceptable
Bahía Hooker Plantas	31,19	Inadecuada	45,96	Inadecuada
Muelle	78,44	Adecuada	77,59	Adecuada
Johnny Cay	84,12	Adecuada	83,12	Adecuada
Influencia Basurero	91,82	Óptima	93,26	Óptima
Frente Sharky's	92,83	Óptima	92,94	Óptima

Fuente: Los Autores.

Por lo tanto, se evidencia que en la época de lluvias se presenta 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 sus 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.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Tabla 5, 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 las ubicaciones de las estaciones y la georreferenciación de estas por medio del sistema de coordenadas proyectadas MAGNA San Andrés, 2007.

Respecto a los dos mapas de calidad hídrica realizados con base en el ICAM, en primera instancia la Fig. 3a 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 es la estación de Bahía Hooker Plantas. 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.

Figura 3a. Mapa de calidad hídrica para San Andrés Isla en época lluviosa
Fuente: Los autores.

Figura 3b. Mapa de calidad hídrica para San Andrés Isla en época seca
Fuente: Los autores.

Por otra parte, la Fig. 3b 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. 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.

3.3 Ejecución del Análisis de Regresión Lineal Múltiple

Finalmente, como se mencionó anteriormente, se eligió el análisis de regresión lineal múltiple (ARL) como complemento al diagnóstico y a la aplicación del ICAM, con el fin realizar proyecciones que permitan inferir en 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. De esta manera, se hallaron ecuaciones correspondientes a un ARL para cada una

de las estaciones y su respectiva época, los valores de la constante y los coeficientes "B" de cada uno de los parámetros considerados como variables independientes (OD, SST, pH, DBO, CFS Y CTT), en donde dichas ecuaciones fueron corroboradas por medio 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 la prueba Durbin-Watson permite determinar la presencia de auto correlación entre los residuos o errores de predicción tal y como se observa en el Tabla 6.

Tabla 6
Resultados del análisis de regresión lineal múltiple por estación y época del año

Estación	Coeficientes							R cuadrado	Durbin-Watson
	Constante	OD	SST	PH	DBO	CFS	CTT		
Punta Hansa	57,055	-0,326	-0,736	5,464	0,578	N/A	-0,051	0,987	0,727
	83,262	-2,139	-0,68	3,602	N/A	-0,022	-0,005	0,977	2
Hotel Isleño	205,821	-0,196	-0,895	-12,435	-0,857	N/A	-0,043	0,997	0,222
	48,605	-1,12	-0,863	6,706	7,912	-0,05	-0,01	0,989	3,068
Punta Norte	66,06	0,77	-0,674	2,95	4,799	-0,019	N/A	0,976	1
	265,635	-1,189	-0,559	-19,097	-7,147	-0,009	N/A	0,998	2,667
Cabañas Altamar	48,47	-0,361	-0,645	6,34	1,404	-0,46	-0,004	0,997	2
	56,445	-2,203	-0,821	6,795	5,786	-0,071	-0,004	0,978	2,96
Alcantarillado	483,241	-3,691	-0,416	-40,357	-35,97	N/A	0	0,989	1,754
	162,734	-11,686	-0,565	1,239	-1,76	0,002	-0,01	0,996	2,733
El Cove	114,412	2,232	-0,64	-3,261	-6,5	-0,006	N/A	0,988	2,835
	89,303	-0,537	-0,902	1,51	0,735	-0,037	-0,002	0,998	1,896
Rocky Cay	104,334	-1,718	-0,289	N/A	1,181	0,363	-0,029	0,985	0,5
	136,655	-0,845	-0,653	-3,763	-1,401	-0,044	-0,005	0,986	2,196
Bahía Hooker Manglar	44,65	-2,52	-0,241	8,978	-5,102	-0,014	-0,005	0,998	2,367
	240,421	0,057	-0,792	-18,009	-2,268	-0,014	-0,005	0,997	2,448
Bahía Hooker Plantas	499,914	2,644	-0,95	-52,07	-0,204	-0,015	-0,007	0,957	1,708
	-329,725	-0,448	-0,05	55,612	-12,256	-0,007	-0,003	0,996	3,093
Muelle	164,208	-1,598	-0,52	-6,529	-3,368	0,037	-0,006	0,988	1,435
	94,863	1,416	-0,516	-0,656	-1,013	-0,017	-0,003	0,996	1,512
Johnny Cay	-7042,97	62,21	1,499	826,584	-34,934	-0,008	N/A	0,997	2,97
	-79,236	-0,054	-0,565	21,282	3,185	-0,015	-0,003	0,969	2,577
Influencia Basurero	154,104	-2,756	-0,765	-4,234	-0,866	-0,075	0,007	0,989	1,053
	76,575	N/A	-0,624	2,718	0,537	-0,059	0,012	0,977	3
Frente Sharky's	46,563	-0,305	-0,423	6,912	-3,155	-0,092	N/A	0,978	0,5
	237,249	-1,085	-0,577	-15,726	-2,41	0,003	-0,057	0,979	1,55

Fuente: Los Autores.

En la Tabla 6 se pueden observar los coeficientes de cada uno de los parámetros con relación a la estación de monitoreo y su época del año, los cuales sirven para la construcción de las ecuaciones de análisis de regresión lineal. El análisis se realiza con un 70% de los datos y la validación de los resultados obtenidos con el 30% restante, con el fin de garantizar la fiabilidad de las proyecciones que se realicen a partir de los coeficientes mostrados en la anterior tabla. Como se aprecia en la tabla el ajuste de las variables independientes respecto de la variable dependiente es en todos los 26 casos superior al 95%, lo que indica que las variables predictoras son explicativas de la variable dependiente o de respuesta. Las ecuaciones resultado de estos análisis fueron las siguientes:

3.3.1 Punta Hansa

Lluvia

$$ICAM = 57{,}055 - (0{,}326 * OD) - (0{,}736 * SST) + (5{,}464 * PH) + (0{,}578 * DBO) - (0{,}051 * CTT) \quad (2)$$

Seca

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

3.3.2 Hotel Isleño

Lluvia

$$ICAM = 205{,}82 - (0{,}196 * OD) - (0{,}895 * SST) - (12{,}435 * PH) - (0{,}857 * DBO) - (0{,}043 * CTT) \quad (4)$$

Seca

$$ICAM = 48{,}604 - (1{,}12 * OD) - (0{,}863 * SST) + (6{,}706 * PH) + (7{,}912 * DBO) - (0{,}05 * CFS) - (0{,}01 * CTT) \quad (5)$$

3.3.3 Punta Norte

Lluvia

$$ICAM = 66{,}06 + (0{,}77 * OD) - (0{,}674 * SST) + (2{,}95 * PH) + (4{,}799 * DBO) - (0{,}019 * CFS) \quad (6)$$

Seca

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

3.3.4 Cabañas Altamar

Lluvia

$$ICAM = 48{,}47 - (10{,}361 * OD) - (0{,}645 * SST) + (6{,}34 * PH) + (1{,}404 * DBO) - (0{,}46 * CFS) - (0{,}004 * CTT) \quad (8)$$

Seca

$$ICAM = 56{,}445 - (2{,}203 * OD) - (0{,}821 * SST) + (6{,}795 * PH) + (5{,}788 * DBO) - (0{,}071 * CFS) - (0{,}004 * CTT) \quad (9)$$

3.3.5 Alcantarillado

Lluvia

$$ICAM = 483{,}241 - (3{,}691 * OD) - (0{,}416 * SST) - (40{,}357 * PH) - (35{,}97 * DBO) - (0{,}0004 * CTT) \quad (10)$$

Seca

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

3.3.6 El Cove

Lluvia

$$ICAM = 114{,}412 + (2{,}232 * OD) - (0{,}64 * SST) - (3{,}261 * PH) - (6{,}5 * DBO) - (0{,}006 * CFS) \quad (12)$$

Seca

$$ICAM = 89{,}303 - (0{,}537 * OD) - (0{,}902 * SST) + (1{,}51 * PH) + (0{,}735 * DBO) - (0{,}037 * CFS) - (0{,}002 * CTT) \quad (13)$$

3.3.7 Rocky Cay

Lluvia

$$ICAM = 104{,}334 - (1{,}718 * OD) - (0{,}289 * SST) + (1{,}181 * DBO) + (0{,}363 * CFS) - (0{,}029 * CTT) \quad (14)$$

Seca

$$ICAM = 136{,}655 - (0{,}845 * OD) - (0{,}653 * SST) - (3{,}763 * PH) - (1{,}401 * DBO) - (0{,}044 * CFS) - (0{,}005 * CTT) \quad (15)$$

3.3.8 Bahía Hooker Manglar

Lluvia

$$ICAM = 46{,}65 - (2{,}52 * OD) - (0{,}241 * SST) + (8{,}978 * PH) - (5{,}102 * DBO) - (0{,}014 * CFS) - (0{,}005 * CTT) \quad (16)$$

Seca

$$ICAM = 240{,}421 + (0{,}057 * OD) - (0{,}792 * SST) - (18{,}009 * PH) - (2{,}268 * DBO) - (0{,}014 * CFS) - (0{,}005 * CTT) \quad (17)$$

3.3.9 Bahía Hooker Plantas

Lluvia

$$ICAM = 499{,}914 + (2{,}644 * OD) - (0{,}95 * SST) - (352{,}07 * PH) - (10{,}204 * DBO) - (0{,}015 * CFS) - (0{,}007 * CTT) \quad (18)$$

Seca

$$ICAM = -329{,}725 - (0{,}448 * OD) - (0{,}05 * SST) + (355{,}612 * PH) - (12{,}256 * DBO) - (0{,}007 * CFS) - (0{,}003 * CTT) \quad (19)$$

3.3.10 Muelle

Lluvia

$$ICAM = 164{,}208 - (1{,}598 * OD) - (0{,}52 * SST) - (6{,}529 * PH) - (3{,}368 * DBO) + (0{,}037 * CFS) - (0{,}006 * CTT) \quad (20)$$

Seca

$$ICAM = 94{,}863 + (1{,}416 * OD) - (0{,}516 * SST) - (0{,}656 * PH) - (1{,}013 * DBO) - (0{,}017 * CFS) - (0{,}003 * CTT) \quad (21)$$

3.3.11 Johnny Cay

Lluvia

$$ICAM = -7042{,}97 + (62{,}21 * OD) + (01{,}499 * SST) + (826{,}584 * PH) - (34{,}934 * DBO) - (0{,}008 * CFS) \quad (22)$$

Seca

$$ICAM = -79{,}236 - (0{,}054 * OD) - (0{,}565 * SST) + (21{,}282 * PH) + (3{,}185 * DBO) - (0{,}015 * CFS) - (0{,}003 * CTT) \quad (23)$$

3.3.12 Influencia Basurero

Lluvia

$$ICAM = 154{,}104 - (2{,}756 * OD) - (0{,}765 * SST) - (4{,}234 * PH) - (0{,}866 * DBO) - (0{,}075 * CFS) + (0{,}007 * CTT) \quad (24)$$

Seca

$$ICAM = 76{,}575 - (0{,}624 * SST) + (2{,}718 * PH) + (0{,}537 * DBO) - (0{,}059 * CFS) - (0{,}012 * CTT) \quad (25)$$

3.3.13 Frente Sharky´s

Lluvia

$$ICAM = 46{,}563 - (0{,}305 * OD) - (0{,}423 * SST) + (6{,}912 * PH) - (3{,}155 * DBO) - (0{,}092 * CFS) \quad (26)$$

Seca

$$ICAM = 237{,}249 - (1{,}085 * OD) - (0{,}577 * SST) - (15{,}726 * PH) - (2{,}41 * DBO) + (0{,}003 * CFS) - (0{,}057 * CTT) \quad (27)$$

Para comprobar que las ecuaciones de ARL cumplen con las condiciones de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de los datos, se utiliza el estadístico Durbin-Watson que evalúa la existencia de autocorrelación para determinar la presencia de algún tipo de dependencia entre las variables independientes. Al analizar los valores obtenidos por el estadístico en la Tabla 6, se evidencia que hay ausencia de autocorrelación debido a que los valores se encuentran cercanos a 2 en un rango de 1 a 3 [11], 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.

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 6 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 7
Resultados del análisis de regresión lineal múltiple por estación y época del año

	Diferencias relacionadas							
			Error tip. de la	95% Intervalo de confianza para la diferencia				Sig.
	Media	Desv.tip.	media	Inferior	Superior	t	gl	(bilateral)
Par 1 ICAM_S -ARL_S	-5.7593	20.7608	2.6802	-11.122	-0.396	-2.149	59	0.036
Par 2 ICAM_L -ARL_L	-2.6352	16.2676	1.8910	-6.404	1.133	-1.394	73	0.168

Fuente: Los Autores.

Los resultados obtenidos mostrados en la tabla 7, evidencian que las variables pareadas fueron seleccionadas así de acuerdo con 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 diferencia relevante. 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.

Al relacionar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con la población y los resultados obtenidos en el ICAM por medio de un Análisis de Componentes Principales ACP, se logró evidenciar que las observaciones por parámetros no se relacionan en gran magnitud con la población y por lo tanto, en términos de calidad hídrica, el aumento poblacional no ha tenido ningún efecto en dicha calidad. Por otra parte, se evidencia una relación directa entre el aumento o disminución de las concentraciones de los parámetros con el ICAM, y permite afirmar que son pocas las estaciones con una calidad inadecuada, y que no existe una diferencia significativa entre la calidad hídrica y la época de estudio.

Finalmente, se realizaron proyecciones de calidad hídrica para los años 2025 y 2035 en ambas épocas. 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 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) para la isla en los años 2025 y 2035. De igual forma, dichos valores representan las posibles concentraciones que se evidenciarían en esos años teniendo en cuenta la misma unidad de medida para la concentración de cada uno.

Tabla 8
Proyección de las concentraciones con relación a la población de San Andrés Islas para los años 2025 y 2035.

AÑO	POBLACIÓN	CFS	CTT	OD	PH	DBO	SST
2025	82,050	164,268	46,906	5,456	8,006	4,203	5,148
2035	87,830	177,036	332,150	4,6949	7,935	6,887	4,087

Fuente: Los Autores.

Los valores obtenidos de calidad hídrica para cada una de las estaciones en cuanto a las concentraciones proyectadas mostradas en la Tabla 8 y su remplazo en las ecuaciones de regresión lineal múltiple, se observan en la tabla 9.

Tabla 9
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	95,27	93,08	82,92	93,47
Hotel Isleño	94,96	83,68	82,38	64,65
Punta norte	93,46	67,05	80,02	50,64
Cabañas Altamar	24,09	36,54	21,35	27,32
Alcantarillado	99,21	98,44	99,23	100,30
El Cove	68,88	90,74	50,56	92,92
Rocky Cay	30,24	85,20	57,85	81,06
Bahía Hooker Manglar	77,56	80,40	63,80	74,78
Bahía Hooker Plantas	88,91	60,01	88,85	22,62
Muelle	96,72	87,50	87,75	83,21
Johnny Cay	99,00	98,73	99,9	95,37
Influencia Basurero	85,59	88,25	87,52	92,83
Frente Sharky's	69,69	90,14	60,23	70,00

Fuente: Los Autores.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las proyecciones para la época lluviosa en ambos años, 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 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.

4 Discusión de Resultados

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 [10] 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 permisibles, 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 el caso del oxígeno disuelto las concentraciones más bajas se presentaron en época de lluvias en las estaciones de Bahía Hooker Manglar y Bahía Hooker Plantas, esto debido posiblemente a que el oxígeno se relaciona de forma inversa con el aumento de la descomposición de sustancias orgánicas originarias de vertimientos puntuales tanto de origen doméstico como de origen agropecuario [12]. Estas estaciones se localizan en ecosistemas de manglar, en donde son comunes las 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 [13,14]. Así mismo, en el caso de los sólidos suspendidos totales 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 a que 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 él, por medio de hojas y madera en descomposición, en donde se suma que las características orográficas de la zona hacen de esta un sistema hídrico casi estacionario, lo que no permite la dispersión de los contaminantes y contribuye a que se registren altas concentraciones de SST [15]. Respecto a los datos con altas concentraciones de SST en época lluviosa en comparación con la época seca, se pueden originar debido a la escorrentía 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 [16]. Para el caso de la DBO 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, esta cumple con los estándares planteados por estar por debajo de 90 mg/L, sin embargo se evidencian gran cantidad de valores atípicos que se originan posiblemente por vertimientos puntuales que se efectúan 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 [17].

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 INVEMAR, no requiere de 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.

Así mismo, 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, ésta se encuentra condicionada por 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 [18].

Respecto a los dos mapas de calidad hídrica realizados con base en el ICAM, es posible observar que la única estación con calidad inadecuada 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 [19] 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.

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 [19]. En 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 [19] 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.

Al realizar el análisis de regresión lineal múltiple para cada una de las estaciones en relación con las dos épocas del año, se lograron desarrollar una serie de ecuaciones que en función del comportamiento de los parámetros desde el año 1998 hasta el año 2014 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.

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 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 domestico sino también de origen agrícola que estén llegando a estas mantengan sus concentraciones allí.

Actualmente en el departamento de San Andrés y Providencia, 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, 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 [19].

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 [20] 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 (Consejo de las Comunidades Europeas, 1991). 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 [21].

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 estos, llegan a la zona marítima- costera generando un impacto ambiental y paisajístico en los recursos marinos y en los ecosistemas de mangle [17].

Los resultados obtenidos en las proyecciones de calidad hídrica para los años 2025 y 2035 pueden deberse a que el histórico de datos refleja una mejoría en la calidad del agua desde el año 1998 hasta el 2014, 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.

5 Conclusiones

A partir del análisis de las series de tiempo de los parámetros fisicoquímicos obtenidos entre los años 1998 y 2014 se pudo diagnosticar la calidad del agua para isla de San Andrés a partir de la aplicación del índice ICAM (Indicador de la Calidad de Agua Marina y Estuarina). Como resultado de la aplicación del ICAM se determinó que la mayoría de las estaciones de monitoreo presentes en San Andrés Isla, registraron una calidad hídrica que varía de aceptable a optima, con excepción de 2 estaciones (Bahía Hooker Manglar y Bahía Hooker Plantas) con calidad inadecuada desde el punto de vista de su uso para la preservación de flora y fauna y el uso recreativo. Además, hay una influencia notoria en las diferencias de calidad entre la época de mayor afluencia turística (época seca) con la época de lluvias. Se propuso una serie de ecuaciones que en función del comportamiento de los parámetros desde el año 1998 hasta el año 2014 permiten predecir los posibles valores futuros de calidad hídrica para la zona nerítica superficial, las cuales 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. 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.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA) por su colaboración para la consecución de los datos con los que se realizó este estudio.

Referencias

[1] M. Rueda *et al.*, «Causas y tensores del cambio en los ecosistemas marinos y costeros y sus servicios: Indicadores de presión», INVEMAR, 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/ier_2015_baja.pdf/f225fda1-eb06-44ad-9d60-535909e85cc6.

[2] B. O. Posada *et al.*, «Estado del ambiente abiótico, calidad de aguas y biodiversidad marina: Indicadores de estado», INVEMAR. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia: Año 2011., Santa Marta, 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/IER_2011.pdf.

[3] A. S. Martínez, S. Hinojosa, y O. S. Rozo, «Proceso y avance hacia la sostenibilidad ambiental: La reserva de biosfera Seaflower, en el Caribe Colombiano», *Cuad. Caribe*, vol. 7, n.º 13, pp. 7–23, 2009.

[4] A. M. Sánchez Jabba, «Manejo ambiental en Seaflower, reserva de biosfera en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina». Bogotá: Banco de la República, nov. 2012, [En línea]. Disponible en: https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll18/id/118/.

[5] CORALINA, «Corporacion para el Desarrollo Sostenible del Archipielago de San Andres, Providencia y Santa Catalina». 2015, [En línea]. Disponible en: http://www.coralina.gov.co/.

[6] Hernández López Mario Ramón, «Evaluación de la incertidumbre de los parámetros y su efecto sobre la incertidumbre predictiva de un modelo hidrológico distribuido, mediante un algoritmo Markv Chain Monte Carlo de tipo adaptativo», Departamentro de Ingenieria Hidraulica y Medio Ambiente, Universitat Politecnica de Valencia, Valencia, España, 2012.

[7] L. J. Vivas-Aguas y S. M. Navarrete-Ramírez., «Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMPFF). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP).», Invemar, GEF y PNUD, Santa Marta, 2014.

[8] W. Brooks, S. Corsi, M. Fienen, y R. Carvin, «Predicting recreational water quality advisories: A comparison of statistical methods», *Environ. Model. Softw.*, vol. 76, pp. 81-94, doi: 10.1016/j.envsoft.2015.10.012.

[9] D. L. Rubinfeld, «Reference guide on multiple regression», *Ref. Man. Sci. Evid.*, vol. 179, pp. 425–469, 2000.

[10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Decreto 1076 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. 2015.

[11] J. M. Arranz y M. M. Zamora, «Autocorrelación I, [en línea] 5campus.com, Sistemas Informativos Contables». 2002, [En línea]. Disponible en: http://www.5campus.com/leccion/autocorrelacionI.

[12] G. Goyenola, «Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuaticos», *Red MAPSA (Eds)*, 2014.

[13] D. J. Randall, W. L. Poon, C. Y. Hungy, y T. K. Tsui, «Fish physiology, toxicology and water quality», 2006, p. 260.

[14] J. P. Parra y L. F. Espinosa, «Acumulación de Pb, Cd y Zn en sedimentos asociados a Rhizophora mangle, en el río Sevilla Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia.», *Revista de la Academia Colombiana de Ciencia*, vol. 120, n.º XXXI, pp. 357-364, 2007.

[15] L. M. Mejía-Quiñones, M. . Molina-Jiménez, A. Sanjuan-Muñoz, M. Grijalba-Bendeck, y L. M. Niño-Martínez, *Bosque de manglar, un ecosistema que debemos cuidar*. .

[16] A. Amaya y J. Murillo, «Monitoreo sistemático de las aguas marino-costeras del Archipielago de San Andres, Providencia y Santa Catalina», CORALINA, San Andrés Isla, Técnico, 2006.

[17] J. A. Garay, Z. Bienvenido-Marín, y A. M. Vélez-G, «Contaminación marino-costera en Colombia». Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia. INVEMAR, 2001.

[18] Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia- REDCAM., «Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras del Caribe y el Pacifico Colombianos», INVEMAR, Santa Marta (Colombia), Técnico, 2013.

[19] 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, [En línea]. Disponible en: http://proactivasai.com/areasocial/descargas/Plan%20de%20Saneamiento%20y%20Manejo%20de%20Vertimientos.pdf.

[20] Consejo de las Comunidades Europeas, *Directiva 91/271/CEE. Sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas*. 1991.

[21] Presidencia de la República de Colombia, *Decreto 510 de 2015. Plan Estratégico para el Archipielago de San Andres, Providencia y Santa Catalina, Colombia*. 2015.

C.A. Durán-Medina, Ingeniero Ambiental (2016) de la Universidad Santo Tomas. Profesional Especializado con más de 4 años de experiencia.

O.J. Esteban-Cantillo, Ingeniero Ambiental (2016) de la Universidad Santo Tomas, con título de especialista de Derecho Ambiental (2020) y estudiante de tercer semestre de la Maestría en Derecho y Gestión Ambiental (Actualmente) de la Universidad del Rosario. Profesional Especializado con más de 4 años de experiencia en la gestión integral de residuos sólidos domiciliarios, en la actualidad trabaja en proyectos de investigación con la Asociación de Investigadores Colombo-Francesa COLIFRI. Experto en temas gestión integral de residuos sólidos en todos sus componentes para la prestación del servicio público domiciliario de aseo y la formalización de recicladores de oficio en Colombia.
ORCID: 0000-0003-0748-8937

A.M. Jaramillo-Londoño, Bióloga Marina (1996) de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, con título de doctorado en Ingeniería Hidráulica y Medio

Ambiente (2009) de la Universidad Politécnica de Valencia (España). Docente-Investigadora con más de 10 años de experiencia, en la actualidad trabaja en la Universidad Santo Tomás. Experta en temas de calidad fisicoquímica y biológica de agua, contaminación de ecosistemas acuáticos por metales pesados y transferencia trófica de contaminantes. Amplia experiencia en estudios de ecología trófica de peces, conservación y biodiversidad de ecosistemas acuáticos.
ORCID: 0000-0001-9465-8513

J.L. Díaz-Arévalo, recibió el título de Ing. Civil en 1994 en la Universidad Santo Tomás (Colombia) y el Diploma de Estudios Avanzados (DEA) en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en 2003 y de Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente en 2010, en la Universidad Politécnica de Valencia (España). Desde el 2011 se ha vinculado como docente universitario en la Universidad Santo Tomás (2011-2018), la Universidad de La Sabana (2018-2020), la Universidad de La Salle (2018-2019). Desde agosto de 2019 docente cátedra en el Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Sus intereses investigativos incluyen temas de hidráulica e hidrología, sistemas de abastecimiento de agua potable, *machine learning* aplicado a temas medioambientales.
ORCID: 0000-0003-4330-1957