



Caracterización de Calidad del Agua Subterránea por Unidades de Planificación Insular en San Andrés Isla.

Documento de análisis en el marco del proyecto “Evaluación, del estado, dinámica y tendencia del agua subterránea” - Contrato Interadministrativo No. 217 de 2017 entre Coralina y la Universidad Nacional de Colombia
Sede Caribe

Jairo Humberto Medina
Director

Universidad Nacional de Colombia
Sede Caribe
Jardín Botánico
San Andrés Isla
2018



CONTENIDO

INTRODUCCION.....	6
1. GENERALIDADES	6
1.1. Objetivo.....	7
1.2. Alcance	7
1.3. Consideraciones de planificación territorial	7
2. ANTECEDENTES	9
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLOGICOS Y VULNERABILIDAD .	12
3.1. Geología	12
3.1.1. Formación San Andrés	12
3.1.2. Formación San Andrés	12
3.2. Hidrogeología.....	15
3.3. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos	17
4. ESCALA DE VALORACION Y CALIDAD DEL AGUA.....	19
4.1. Generalidades.....	19
4.2. Metodología	20
4.3. Análisis.....	22
4.3.1. Estadística descriptiva	23
4.3.1.2. Nitratos	27
4.3.2. Escala de valoración vs calidad del agua	39
5. INDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO – IRCA MODIFICADO.....	42
5.1. Generalidades.....	42
5.2. Metodología	43
5.3. Cálculo del IRCA.....	46
5.4. Análisis geoestadístico del IRCA.....	51
6. RELACION COLIFORMES FECALES VS ENTEROCOCOS	55
6.1. Generalidades.....	55
6.2. Metodología	55
6.3. Cálculo del radio CF/E	56
6.4. Análisis geoestadístico del radio CF/E	59
7. CONCLUSIONES.....	63
8. BIBLIOGRAFIA	65





LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de Unidades de Planificación Insular en la isla de San Andrés.....	8
Figura 2. Distribución espacial por zonas de monitoreo de la calidad de agua subterránea en la isla de San Andrés.	11
Figura 3. Mapa geológico en la isla de San Andrés.	14
Figura 4. Mapa hidrogeológico de la isla de San Andrés	16
Figura 5. Mapas de vulnerabilidad a la contaminación en San Andrés isla.	18
Figura 6. Conductividad eléctrica.....	26
Figura 7. Nitratos	30
Figura 8. Coliformes fecales	34
Figura 9. Enterococos.....	38
Figura 6. Análisis geoestadístico IDW para el IRCA en las UPI's urbanas	52
Figura 7. Análisis geoestadístico IDW para el IRCA en las UPI's rurales	53
Figura 8. Análisis geoestadístico IDW para el IRCA en las UPI's.....	54
Figura 9. Análisis geoestadístico IDW para el radio CF/E en las UPI's urbanas.....	60
Figura 10. Análisis geoestadístico IDW para el radio CF/E en las UPI's rurales.....	61
Figura 11. Análisis geoestadístico IDW para el radio CF/E en las UPI's	62





LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Promedio de valores de conductividad eléctrica por UPI's rurales.....	23
Grafica 2. Promedio de valores de conductividad eléctrica por UPI's urbanas	24
Grafica 3. Promedio de valores de conductividad eléctrica por UPI	25
Grafica 4. Promedio de concentraciones de nitratos en UPI's rurales	27
Grafica 5. Promedio de concentraciones de nitratos en UPI's urbanas	28
Grafica 6. Promedio de concentraciones de nitratos por UPI	29
Grafica 7. Promedio del Log (Coliformes Fecales) por UPI's rurales.....	31
Grafica 8. Promedio del Log (Coliformes Fecales) por UPI's urbanas.....	32
Grafica 9. Promedio del Log (Coliformes Fecales) por UPI	33
Grafica 10. Promedio del Log (Enterococos) por UPI's rurales	35
Grafica 11. Promedio del Log (Enterococos) por UPI's urbanas	36
Grafica 12. Promedio del Log (Enterococos) por UPI.....	37
Grafica 13. Porcentaje de la valoración de la calidad de los pozos analizados.	39
Grafica 14. Valoración de la calidad en UPI's urbanas.....	40
Grafica 15. Valoración de la calidad en UPI's rurales.....	41
Grafica 16. Porcentaje del IRCA en los pozos analizados.	47
Grafica 17. IRCA en UPI's urbanas.....	48
Grafica 18. IRCA en UPI's rurales.....	50
Grafica 19. Porcentaje del radio CF/E en los pozos analizados.	57
Grafica 20. Origen de la contaminación fecal en UPI's urbanas.....	58
Grafica 21. Origen de la contaminación fecal en UPI's rurales.....	59





LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros seleccionados para la escala de valoración y pesos específicos	21
Tabla 2. Escala de valoración para la calidad del agua subterránea en San Andrés isla.	22
Tabla 3. Cuadro de parámetros contaminantes.	43
Tabla 4. Parámetros y puntajes IRCA.	44
Tabla 5. Clasificación nivel de riesgo según el IRCA por muestra.....	45
Tabla 6. Clasificación del riesgo según IRCA UPI's urbanas	49
Tabla 7. Clasificación del riesgo según IRCA UPI's rurales	50
Tabla 8. Clasificación del origen fecal de la contaminación según radio CF/E.	56





INTRODUCCION

La calidad de las aguas puede verse afectada por agentes naturales y de origen antrópico. No obstante, algunos contaminantes, dispersados ampliamente en el ambiente por la actividad humana, están ahora percolando a las aguas subterráneas.

En general, las fuentes principales de contaminación subterránea en la isla de San Andrés son: las aguas residuales domésticas, lixiviados que percolan en la columna de agua, el arrastre por aguas lluvias de material particulado, los residuos sólidos, entre otros.

Todos estos factores externos han originado, por un lado, el deterioro de la calidad de las fuentes de agua subterránea y por otro, hecho más reciente, la preocupación general por parte de instituciones del orden nacional y regional en adelantar estrategias que permitan conservar el recurso tanto en el tiempo como en el espacio.

Entre las acciones estratégicas y operativas en la gestión del recurso hídrico subterráneo se encuentra el monitoreo del cuerpo de agua para detectar su calidad, lo que conduce a la obtención de una inmensa cantidad de datos de varios parámetros, incluso dimensionalmente distintos, que logran en su conjunto inferir patrones de contaminación.

Así mismo, la evaluación de la calidad del agua es lograr, mediante un proceso continuo y sistemático, conocimiento e información sobre el estado del agua, su dinámica, alteraciones y tendencias, que permitan mejorar la gestión integral del recurso hídrico, todo ello consensuado armónicamente por parte de las instituciones responsables que permitan una adecuada administración, uso y manejo sostenible del agua subterránea.

En este sentido, este estudio pretende caracterizar y evaluar las condiciones de calidad de agua subterránea y afectación que ejercen las diferentes Unidades de Planificación Insular (UPI's) de San Andrés isla y definir las condiciones actuales mediante herramientas metodológicas tales como la escala de valoración propuesta por CORALINA y el cálculo del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano - IRCA modificado de acuerdo con la Resolución 2115 de 2007, a fin de determinar la calidad química y sanitaria de diferentes puntos de captación del recurso hídrico subterráneo a través de la recolección y análisis estadístico de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

Así mismo, se busca establecer mediante el cálculo del cociente coliformes fecales y enterococos (CF/E) el origen de la contaminación humana/animal en los diferentes pozos analizados en las UPI's urbanas y rurales de la isla de San Andrés. GENERALIDADES





1.1. Objetivo

El objetivo general del estudio es llevar a cabo la caracterización de la calidad de agua subterránea por Unidades de Planificación Insular- UPI's en la isla de San Andrés con base a un muestreo estadístico significativo a partir de pozos identificados e inventariados, usando para ello la metodología -IRCA modificado- establecida por CORALINA y teniendo como base el marco conceptual y metodológico para la evaluación regional del agua-ERA.

1.2. Alcance

Este documento incluye la metodología y análisis para determinar el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano -IRCA, planteado en la Resolución 2115 de 2007 con las modificaciones del caso teniendo en cuenta que se trata de una fuente de agua diferente a la potable¹, y realizar una aproximación cuantitativa para definir el origen fecal de la contaminación con base en la relación coliformes fecales/enterococos.



1.3. Consideraciones de planificación territorial

El presente estudio tiene en consideración las áreas geográficas establecidas en el Plan de Ordenamiento Territorial – POT, es decir, las Unidades de Planificación Insular (UPI's), teniendo como referencia la información estadística del DANE del número de unidades habitacionales por área, donde se definieron la cantidad significativa de los puntos de captación a caracterizar (pozos). Es así como las unidades de planificación insular – UPI's definidas para el Departamento son en total 31, 19 urbanas y 12 rurales (Figura 1).

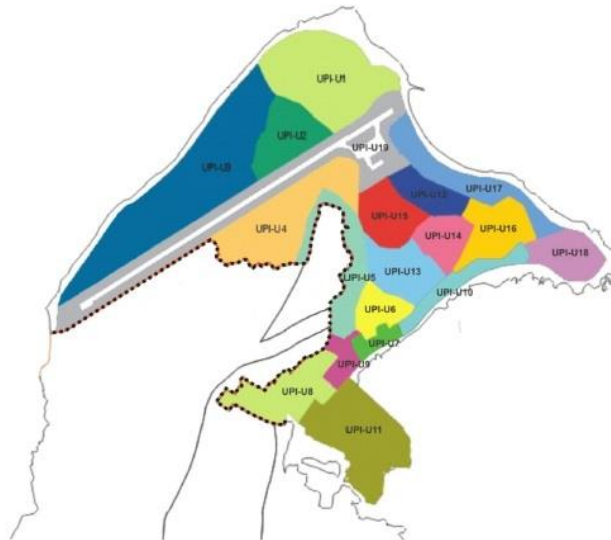
¹ Propuesta de escala de valoración de la calidad sanitaria del agua subterránea en la isla de San Andrés. CORALINA. 2010

De Conformidad con el Decreto 325 de 18 de Noviembre de 2003 el suelo Urbano y Rural se define a través de las siguientes UPIs:

ZONA URBANA

UNIDADES DE PLANIFICACION INSULAR URBANA (UPI-U).

Residencial de Consolidación Sarte Bay	UPI-U1
Protección Ambiental Little Cliff	UPI-U2
Residencial de Desarrollo Red ground y Rock ground	UPI-U3
Residencial de Mejoramiento Integral Natania	UPI-U4
Espacio Público de Desarrollo Jardín de borde urbano el Cliff	UPI-U5
Residencial de Recualificación y Conservación Cotton tree	UPI-U6
Residencial de Consolidación Los almendros	UPI-U7
Residencial de Consolidación Barrio Obrero- el Bight	UPI-U8
Equipamientos de consolidación Centralidad Educativa	UPI-U9
Equipamientos de consolidación Nixon point	UPI-U10
Equipamientos de consolidación Multifuncional Portuaria	UPI-U11
Equipamientos de consolidación Swamp Ground deportiva	UPI-U12
Equipamientos de consolidación Black Dog	UPI-U13
Renovación de grandes Equipamientos Rock Hole	UPI-U14
Residencial de Renovación Swamp ground residencial	UPI-U15
Recualificación Comercial Hell Gate	UPI-U16
Renovación Hotel era Comercial Spratt Bight	UPI-U17
Consolidación Urbanística de Punta Hansa	UPI-U18
Consolidación de Equipamiento Aeropuerto	UPI-U19



ZONA RURAL .

Incumben al suelo rural los terrenos destinados a los usos no indicados para el suelo urbano, tales como: rutinas agropecuarias, agrícolas, de aprovechamiento de recursos y actividades similares. Dentro de la clasificación del suelo rural se encuentra el suelo suburbano y Los asentamientos dispersos.

UNIDADES DE PLANIFICACION INSULAR RURALES (UPI-R).

- Asociadas a la Protección de medio Ambiente

North Cliff	UPI-R1
Residencial de Renovación Jardín de borde urbano Jones Road	UPI-R2
Residencial Especial, Jardín de borde - transición urbano - rural	UPI-R3
Reserva Forestal	UPI-R4
Reserva de Biosfera Parque regional Bahía Hooker	UPI-R5
Reserva mundial de biosfera cuenca del Cove corredor Suburbano Cove y la Loma	UPI-R6
Sub Urbana de grandes equipamientos	UPI-R7

- Asociadas al manejo de agua lluvia y suelos productivos (Distritos).

Distrito de Riego	UPI-R8
Vivienda Nativa Asociada a actividad agrícola sostenible – corredor suburbano de San Luis.	UPI-R9
Agropecuaria Primaria 1 Corredor sub urbano Pepper Hill – Four Corner – Tom Hooker.	UPI-R10
Agropecuaria primaria 2 Corredor suburbano Eley Bar.	UPI-R11
Agropecuaria secundaria Corredor Suburbana del Cove.	UPI-R12



Figura 1. Localización de Unidades de Planificación Insular en la isla de San Andrés
Fuente: GISLand, 2018



2. ANTECEDENTES

CORALINA como entidad del estado que hace parte del Sistema Nacional Ambiental, y conforme a la ley 99 de 1993 tiene la misión de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible. Tienen como objeto la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente y recursos naturales renovables, así como dar cumplida y oportuna aplicación a las disposiciones legales vigentes sobre su disposición, administración, manejo y aprovechamiento (Ley 99 de 1993). Entre otras funciones se resalta en esta ley:

1. *“Otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias ambientales requeridas por la ley para el uso, aprovechamiento o movilización de los recursos naturales ...” (Ibíd.)*
2. *Ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, ..., lo cual comprenderá el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos a las aguas en cualquiera de sus formas, ..., así como los vertimientos o emisiones que puedan causar daño o poner en peligro el normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. Estas funciones comprenden la expedición de las respectivas licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y salvoconductos...” (Ibíd.)*
3. *“Promover y ejecutar programas de abastecimiento de agua a las comunidades indígenas y negras tradicionalmente asentadas en el área de su jurisdicción en coordinación con las autoridades competentes” (Ibíd.)*
4. *“Ordenar y establecer las normas y directrices para el manejo de las cuencas hidrográficas” (Ibíd.)*



Estas funciones justifican a plenitud la necesidad de contar con una base técnica para tomar decisiones pertinentes con respecto al recurso hídrico ya que reflejarán la situación actual y tendencias en el estado y comportamiento del agua en San Andrés. Al respecto el IDEAM (2011) menciona que en el desarrollo de estas acciones se deberá evaluar datos, generar información, analizar integralmente y generar el conocimiento necesario para una adecuada gestión integral del recurso hídrico a la vez que evidencia vacíos que deben ser cubiertos con acciones de mejoramiento de la calidad de la información. Adicionalmente, la información sirve de apoyo en la aplicación de instrumentos económicos y en la elaboración y seguimiento de los planes ambientales y de gestión.

Así las cosas, la entidad ambiental inicio la Red de Calidad de Agua Subterránea en el segundo semestre del año 1999, y desde entonces los monitoreos se han realizado considerando que para la isla el régimen climático es monomodal, caracterizándose una época de verano que va desde enero hasta mayo, y otra de invierno desde el mes de



junio hasta el mes de diciembre; llevando a cabo un monitoreo en periodo seco y otro en el de lluvias, con lo cual se pretende conocer la variabilidad en el comportamiento de la calidad del agua subterránea entre los dos períodos. La Red de Calidad está conformada por 41 puntos de monitoreo distribuidos según muestra la **Figura 2**²:



² Diagnóstico actualizado de la oferta y demanda de agua en la isla de San Andrés para toma de decisiones a nivel de administración del Recurso Hídrico (2016-2017). CORALINA. 2017

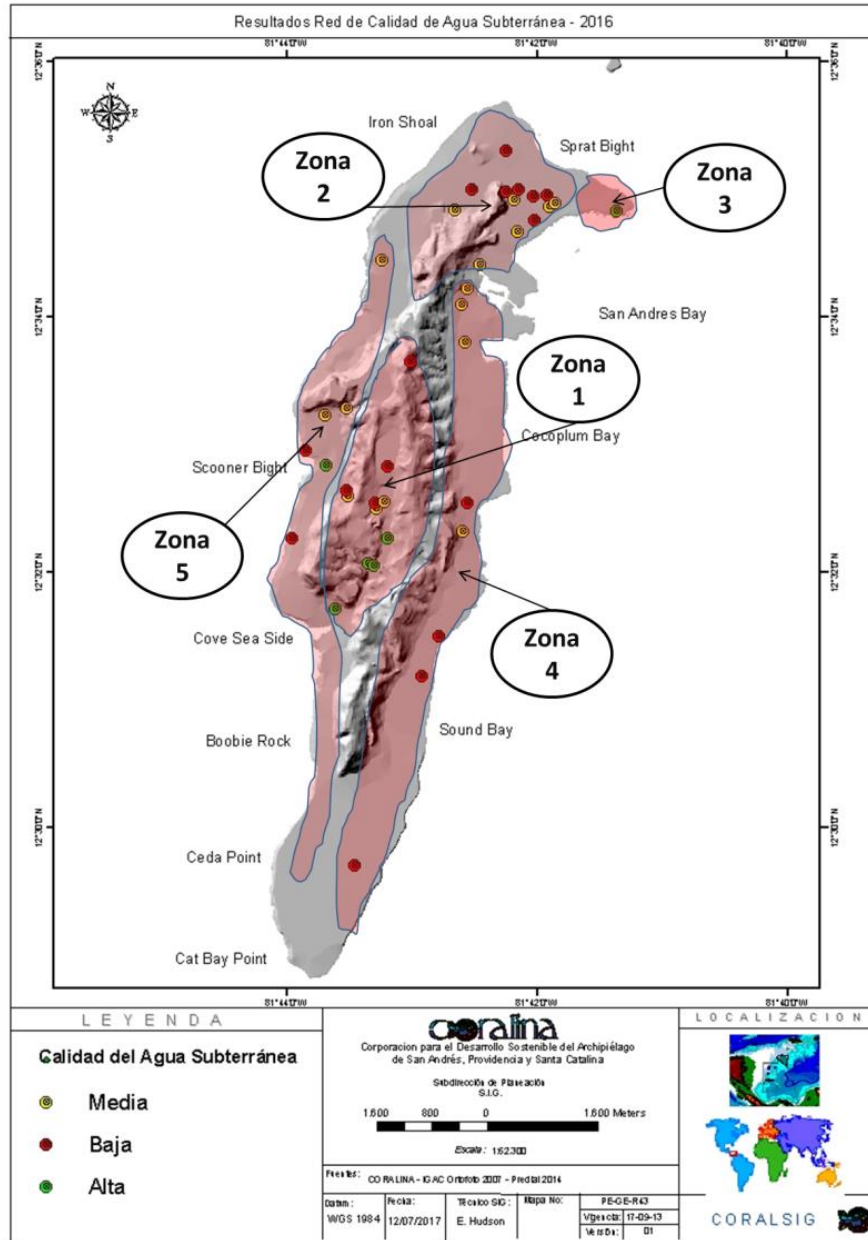


Figura 2. Distribución espacial por zonas de monitoreo de la calidad de agua subterránea en la isla de San Andrés.

Fuente: Diagnostico actualizado de la oferta y demanda de agua en la isla de San Andrés para toma de decisiones a nivel de administración del Recurso Hídrico (2016-2017). CORALINA. 2017

La ubicación de cada punto de monitoreo juega un papel clave a la hora de entender y predecir su comportamiento, no sólo por las características intrínsecas del suelo sino también por las influencias antrópicas a las que puede estar expuesto en mayor o menor medida dependiendo de su localización y de la formación geológica que delimite al acuífero. El agua subterránea en la isla de San Andrés es vulnerable a la



contaminación debido a las características kársticas que permiten la infiltración y el arrastre de los contaminantes, siendo mayor esta vulnerabilidad en ciertas zonas.

La red de calidad se apoya en la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social y de un ejercicio propio realizado en el 2009 con expertos nacionales para determinar parámetros, pesos de importancia ponderados y metodología de valoración para establecer el grado de contaminación de acuíferos en el Archipiélago³.

3. ASPECTOS GEOLÓGICOS, HIDROGEOLOGICOS Y VULNERABILIDAD

3.1. Geología

La isla de San Andrés presenta dos (2) formaciones geológicas de origen calcáreo (**Figura 3**), sobre las cuales se encuentran depósitos cuaternarios, los sedimentos calcáreos se depositaron sobre un basamento ígneo – volcánico⁴.



3.1.1. Formación San Andrés

Conjunto predominantemente calcáreo, de edad Mioceno medio a tardío, que compone la totalidad del relieve de la isla (colinas centrales). Presenta porosidad secundaria por grietas y disolución de carbonatos, y en menor escala porosidad primaria en los miembros más arenosos⁵.

Esta formación alcanza los 150 m de profundidad. Inicia con calizas y calizas arcillosas; seguido de un miembro arenoso intercalado con capas de calizas que alcanza un espesor máximo de 32 m. Continúa la secuencia con un miembro de arcillas calcáreas blancas, pardas y negras, con un espesor máximo de 15 m, se plantea que este cuerpo es de forma lenticular y se acuña hacia el centro de la isla. En el tope unas calizas detríticas arenosas, las cuales se encuentran compactas, carstificadas, con efectos de disolución

3.1.2. Formación San Andrés

La formación San Luis está constituida por calizas coralinas arrecifales, de composición bioesparítica. Esta unidad de rocas constituye la plataforma continental de la Isla de San Andrés, que se manifiesta por desarrollar una morfología plana a ligeramente inclinada hacia el océano. De acuerdo a registros de perforaciones realizadas en esta formación, se estima que el espesor de la formación San Luis alcanza los 15 m.

³ Diagnóstico actualizado de la oferta y demanda de agua en la isla de San Andrés para toma de decisiones a nivel de administración del Recurso Hídrico (2016-2017). CORALINA. 2017

⁴ Plan Director del Recurso Hídrico de San Andrés. Producto 3. Estudios complementarios. Gobernación de San Andrés- Findeter. CDM Smith. 2016

⁵ Modelación del acuífero San Andrés Isla. Proyecto INAP – Colombia. Coralina & UNAL. (2010).



La formación San Luis se encuentra constituida predominantemente por calizas cristalinas coralinas y localmente en las zonas de transición continental a marina por areniscas calcáreas de grano grueso. Las calizas coralinas presentan texturas cristalinas gruesas, con estructuras biogénicas tabulares dispuestas radial y concéntricamente. Los afloramientos de estas rocas se presentan principalmente en la zona costera ya que al interior de la zona continental se encuentran cubiertos por un suelo residual arcilloso de color rojizo y con espesores medios de 50 cm. Las areniscas calcáreas se exponen como barras marinas. Son rocas inmaduras, constituidas por fragmentos tamaño arena gruesa a grava de restos de moluscos (conchas)⁶.



⁶ Geología y Aspectos Geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. Geología Colombiana. No.29, 71 - 87. Vargas, G. 2004.



3.2. Hidrogeología.

Para San Andrés se identifican los siguientes sistemas acuíferos (**Figura 4**)⁷:

- Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular.
- Acuíferos discontinuos de extensión local de baja productividad, conformados por sedimentos cuaternarios de ambiente coluvial. Acuíferos libres con agua de buena calidad. Asociados en el área de estudio a los depósitos de ladera, derrubios y coluviones.
- Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas 1 (rocas fracturadas y/o carstificadas).
- Acuíferos continuos de extensión regional, de alta productividad, conformados por rocas sedimentarias calcáreas consolidadas en ambiente marino. Acuíferos libres o confinados con agua de buena calidad. Asociados a la formación San Andrés.
- Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas 2 (rocas fracturadas y/o carstificada).
- Acuíferos continuos de extensión regional, de baja productividad de agua dulce, conformados por rocas sedimentarias calcáreas consolidadas en ambiente marino. Acuíferos libres con agua de regular a mala calidad química, saladas. Asociado a la formación San Luis.
- Sedimentos y rocas con limitados a ningún recurso de aguas subterráneas.
- Complejo de sedimentos y rocas con muy baja productividad de agua dulce, constituidos por depósitos cuaternarios no consolidados de ambientes lacustres, y marinos, de origen marino. Almacenan aguas de regular a mala calidad química, saladas. Asociados a los depósitos cuaternarios de arena de playa, depósitos de Manglar.



⁷ Plan Director del Recurso Hídrico de San Andrés. Producto 3. Estudios complementarios. Gobernación de San Andrés- Findeter. CDM Smith. 2016

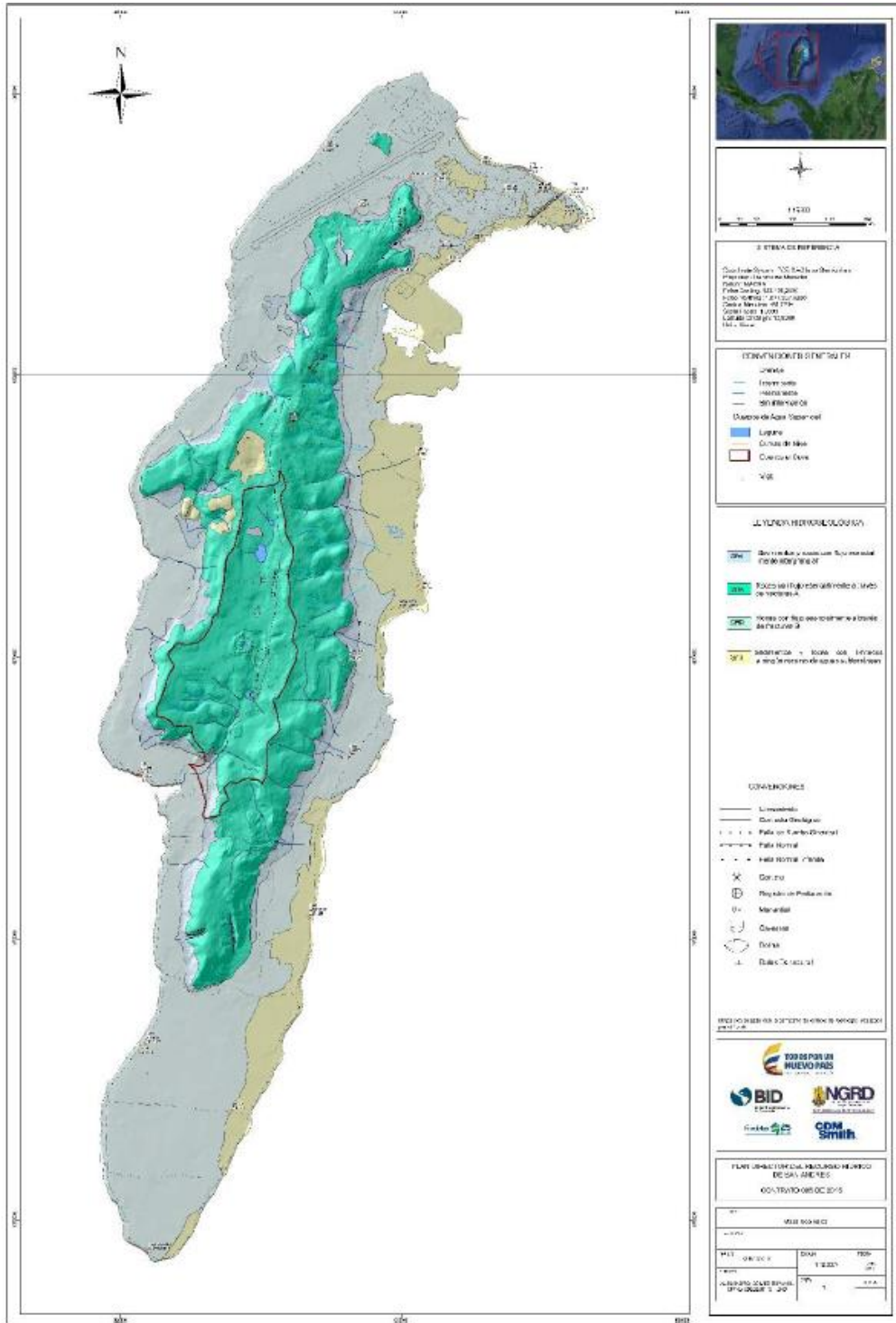


Figura 4. Mapa hidrogeológico de la isla de San Andrés

Fuente: Plan Director del Recurso Hídrico de San Andrés. Producto 3. Estudios complementarios. Gobernación de San Andrés- Findeter. CDM Smith. 2016



3.3. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos

Se dice que un sistema acuífero es vulnerable ante cierta acción cuando ésta puede causar un perjuicio (daño, deterioro o degradación) del acuífero. La vulnerabilidad sería una medida cualitativa o cuantitativa, en general expresada mediante un índice sin dimensiones, de la mayor o menor facilidad con que se puede infligir ese perjuicio⁸.

Existen diferentes metodologías, entre las que se destaca el método paramétrico GOD, que se define como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes⁹.

Así las cosas, un estudio de empleo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica¹⁰ arroja mayores detalles de zonas particulares del acuífero que no fueron consideradas en anteriores investigaciones y precisa la clasificación generalizada de vulnerabilidad extrema para la formación San Luis y moderada para la formación San Andrés, ya que existen otro tipo de zonas con formaciones suprayacentes que particularmente le imprimen al modelo mayor información (**Figura 5**).

Adicional a ello, el análisis concluye que la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos está influenciada fuertemente por los procesos de variabilidad climática y a lo largo de periodos cortos de tiempo, posiblemente debido a la conformación geológica de la isla, que la hace más susceptible al ingreso directo de los contaminantes a la superficie freática.



⁸ Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad: Identificación de zonas críticas. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). Chile. 2006

⁹ Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Artículo de Investigación. Pérez y Pacheco / Ingeniería 8-1 (2004) 33-42. Pérez y Pacheco. 2004

¹⁰ SIG de zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la isla de San Andrés. Liane G. 2013

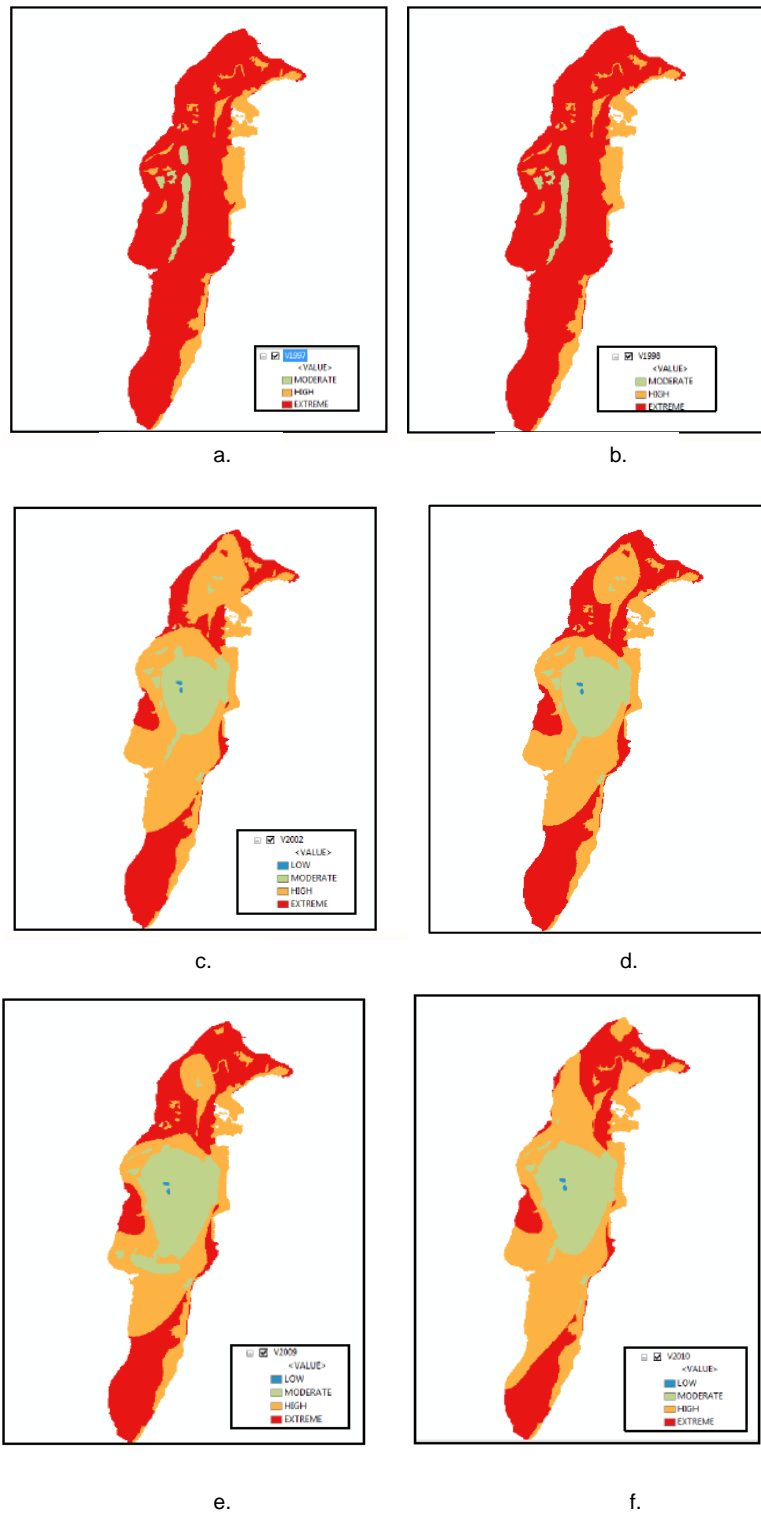


Figura 5. Mapas de vulnerabilidad a la contaminación en San Andrés isla.
Fuente: SIG de zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la isla de San Andrés.
Liane G. 2013



4. ESCALA DE VALORACION Y CALIDAD DEL AGUA

4.1. Generalidades

El concepto de calidad de agua está relacionado con muchas variables asociadas con los usos que tiene el recurso hídrico. Es necesario ampliar la discusión en la agrupación y ponderación que se le deben dar a estas variables, reflejado en los Índices de Calidad del Agua (ICA), de tal manera que se lleguen a ponderaciones representativas de niveles regional y local.

A nivel mundial se han desarrollado innumerables métodos para clasificar el agua según su calidad o grado de contaminación. El más común es el Índice de Calidad del Agua (ICA), que se caracteriza por ser una forma de agrupación simplificada de algunos parámetros, indicadores de un deterioro en la calidad del agua. Sin embargo, para que dicho índice sea práctico debe de reducir la enorme cantidad de parámetros a una forma más simple, y durante el proceso de simplificación algo de información se sacrifica. Por otro lado, si el diseño del ICA es adecuado, el valor arrojado puede ser representativo e indicativo del nivel de contaminación y comparable con otros para enmarcar rangos y detectar tendencias.

Para la agrupación de los parámetros existen dos (2) técnicas básicas; las denominadas aritméticas y las multiplicativas. A su vez pueden o no ponderarse con pesos específicos para cada parámetro. Algunos autores prefieren realizar los cálculos a través de técnicas multiplicativas, que son mucho más sensibles que los aritméticos a la variación de los parámetros, por lo que reflejan con mayor precisión un cambio de calidad.

En cuanto a la ponderación, se plantea que al asignar pesos específicos a los parámetros tiene el riesgo de introducir cierto grado de subjetividad en la evaluación. Pero, por otro lado, sugiere que es importante una asignación racional y unificada de dichos pesos de acuerdo al uso del agua y de la importancia de los parámetros en relación al riesgo que implique el aumento o disminución de su concentración.

Método Delphi: El método Delphi procede por medio de la interrogación a expertos con la ayuda de cuestionarios sucesivos, a fin de poner de manifiesto convergencias de opiniones y deducir eventuales consensos. La encuesta se lleva a cabo de una manera anónima (actualmente es habitual realizarla haciendo uso del correo electrónico o mediante cuestionarios web establecidos al efecto para evitar los efectos de "líderes" ().



4.2. Metodología

El siguiente esquema resume la forma en que se llevó a cabo este estudio (Diagrama 1).

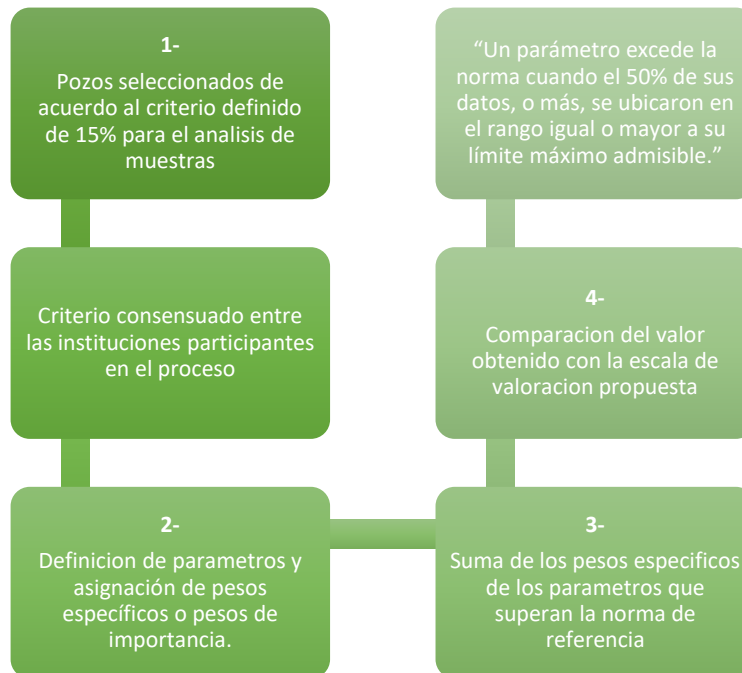


Diagrama 1. Metodología para determinar la calidad y escala de valoración
Fuente: Propia

- 1 Definición del número de pozos:** La isla de San Andrés ha definido 19 Unidades de Planificación Insular – UPI's dentro del perímetro urbano y 12 Unidades de planificación en suelo rural. En total para la isla de San Andrés, se registraron 14.841 viviendas¹¹ distribuidas porcentualmente por Unidad de Planificación.

Sobre esa distribución porcentual se definió con la Corporación Ambiental que la muestra significativa para efectuar el inventario de pozos es de un 15% del total de la isla; dada la capacidad operativa de la Corporación Ambiental se definió un análisis en laboratorio de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua a 336 muestras distribuidas porcentualmente por UPI, de las cuales fueron eliminadas cuatro (4) por carencia de datos en los parámetros analizados.

- 2 Definición de parámetros indicadores y asignación de pesos específicos:** Se escogieron los parámetros indicadores y los pesos de importancia que se

¹¹ Caracterización de la población del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Fase 1 y Fase 2. DANE 2014



emplearán para la escala de valoración de acuerdo con el estudio de CORALINA¹².

En la **Tabla 1** se detallan los parámetros seleccionados con sus pesos específicos o de importancia cuya sumatoria es 1,00.

Tabla 1. Parámetros seleccionados para la escala de valoración y pesos específicos
Fuente: Propuesta de valoración de la calidad sanitaria del agua subterránea en la isla de San Andrés. Shelly P. 2010

Parámetro	Pesos específicos o de importancia
Nitratos	0,16
pH	0,13
C.E	0,17
C. Totales	0,17
C. Fecales	0,19
Enterococos	0,18
Total	1,00



- 3 Suma de los pesos específicos de los parámetros que superan la norma de referencia:** Sólo se suman los pesos específicos planteados si los parámetros superan la norma de referencia (Método aditivo). Se entiende por superar la norma a aquellos parámetros donde el 50% de los datos, o más, superaron el límite máximo admisible planteado en la Resolución 2115 de 2007¹³.

Así las cosas, los valores máximos establecidos por la Resolución 2115 de 2007 para los parámetros analizados son: pH (6.5 a 9.0), nitratos (10 mg/l), conductividad (1000 µS/cm), coliformes totales (0 UFC/ 100 ml) y coliformes fecales (0 UFC/100 ml). Pese a que el parámetro enterococos no se considera dentro de esta Resolución, se infiere que si no se acepta ninguna unidad formadora de colonia (UFC) para coliformes fecales tampoco es aceptable la presencia de UFC para microorganismos del tipo enterococos.

La Resolución 2115 de 2007 es la norma que se emplea como referencia en virtud de que el agua de los pozos analizados es usada para consumo humano y doméstico en actividades tales como:

- Bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato.
- Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.

¹² Propuesta de valoración de la calidad sanitaria del agua subterránea en la isla de San Andrés. Shelly P. 2010.

¹³ *Ibíd.*



- c) Preparación de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, que no requieren elaboración.

4 Comparación del valor obtenido con la escala de valoración propuesta: El valor obtenido de la sumatoria se compara con los rangos en la escala de valoración propuesta la cual determina el grado de calidad que posee la muestra analizada. Considerando que el pH es el parámetro que obtuvo el menor peso de importancia según la distribución de pesos promediada y que la conductividad eléctrica está relacionada con características particulares de la isla, se asumen que, para fines de determinar la escala de valoración final, el mejor resultado posible en una muestra de agua es aquel en que la sumatoria de pesos de importancia de los parámetros que superan la norma sea igual o mejor a 0,30 puntos. El peor de los resultados se considera aquel en el que la sumatoria de los pesos de importancia de los parámetros que superan la norma sea igual o mayor a 0,52 puntos.



En la **Tabla 2** se observa la escala de valoración para la calidad del agua subterránea en San Andrés isla propuesta por CORALINA¹⁴ y empleada en este trabajo.

Tabla 2. Escala de valoración para la calidad del agua subterránea en San Andrés isla.

Fuente: Propuesta de valoración de la calidad sanitaria del agua subterránea en la isla de San Andrés. Shelly P. 2010

Valoración	Escala	Observaciones
Calidad Alta (CA)	$\leq 0,30$	Se asume para este caso, que el agua tiene una calidad alta cuando la sumatoria de los pesos de importancia de los parámetros que sean menores o iguales a 0,30. Con lo que sólo se ha excedido la norma de referencia en uno o dos de los parámetros fisicoquímicos.
Calidad Media (CM)	$\geq 0,31$ y $< 0,51$	Se asume una calidad media porque dicho rango está relacionado con parámetros fisicoquímicos y/o microbiológicos.
Calidad Baja (CB)	$\geq 0,52$ y ≤ 1	Está relacionado con parámetros de calidad cuya concentración puede ser producto, casi exclusivo, de focos de contaminación como vertimiento de aguas negras, mala disposición de aguas domésticas residuales u actividades agropecuarias.



4.3. Análisis

En este estudio se tuvieron en cuenta los datos de 29 UPI's distribuidas en 18 urbanas y 11 rurales, excepto las unidades de planificación R1 y U9 cuyos registros no fueron tenidos en cuenta debido a datos incongruentes.

¹⁴ Ibid.

4.3.1. Estadística descriptiva

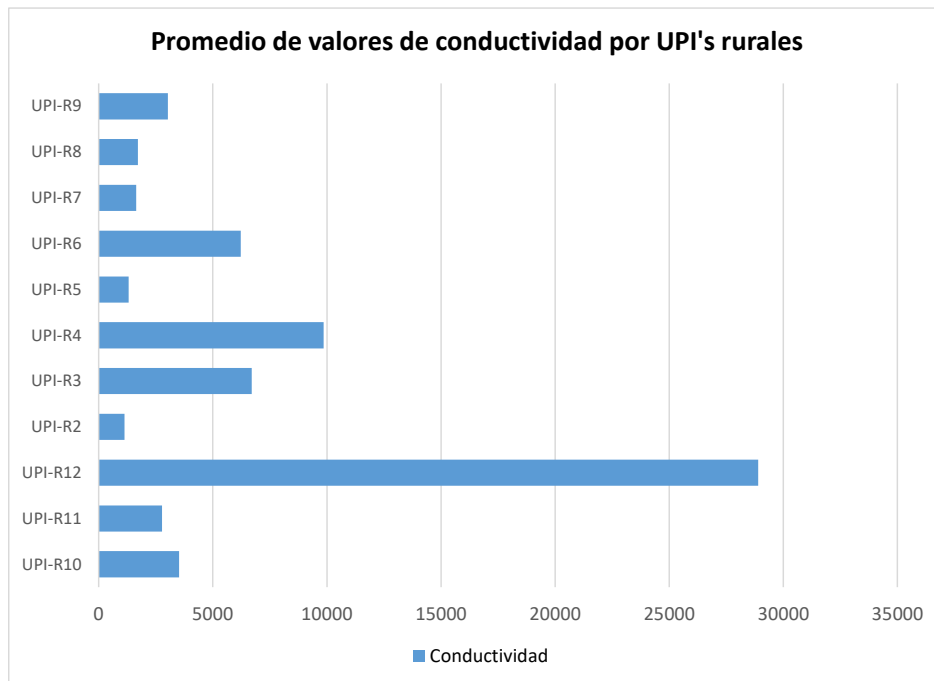
Se presenta la estadística descriptiva de algunas variables relevantes de contaminación en aguas subterráneas tales como conductividad eléctrica por ser indicador del grado de intrusión salina, la concentración de nitratos por su incidencia en la salud pública y coliformes fecales y enterococos como agentes de enfermedades de transmisión hídrica.

Para el caso de los parámetros microbiológicos fue necesario realizar un tratamiento a los datos debido a que el comportamiento de los mismos obedece a la propia naturaleza de estos analitos atribuible a que son productos vivos cuya dinámica difiere de las características fisicoquímicas, obteniéndose valores muy altos por crecimiento bacteriano de tendencia exponencial que pueden generar sesgos notables. Así las cosas, los valores de coliformes y enterococos fueron normalizados convirtiéndolos a logaritmo ⁽¹⁰⁾ por la curva que experimentan en su comportamiento poblacional para luego calcular el promedio general y por UPI.



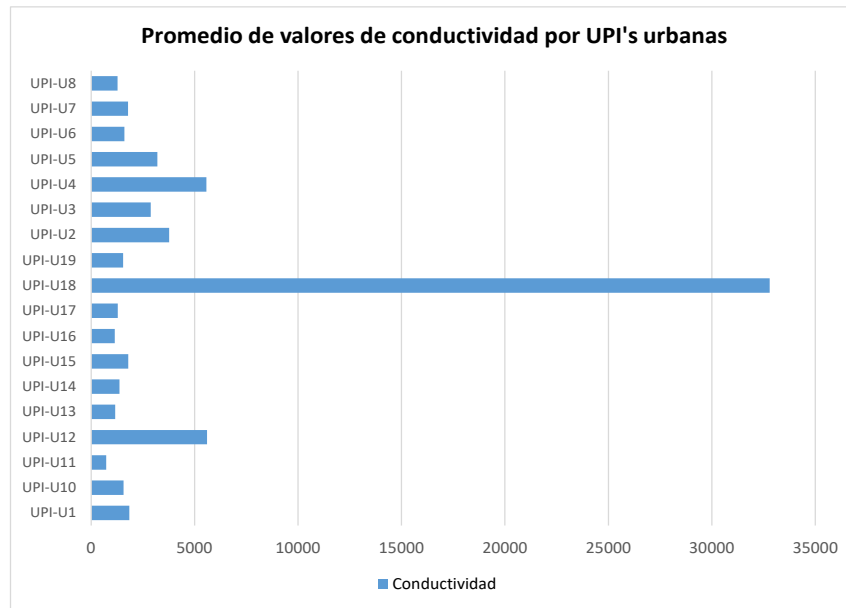
4.3.1.1. Conductividad eléctrica

Se puede observar en primera instancia que la conductividad eléctrica en las UPI's rurales superan el valor máximo permisible (1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) por la Resolución 2115 de 2007 encontrándose el registro más alto para la R12 de 28900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que según la clasificación de W. de Breack, 1991 corresponde a un agua salada (**Grafica 1**).



Grafica 1. Promedio de valores de conductividad eléctrica por UPI's rurales.
Fuente: Propia

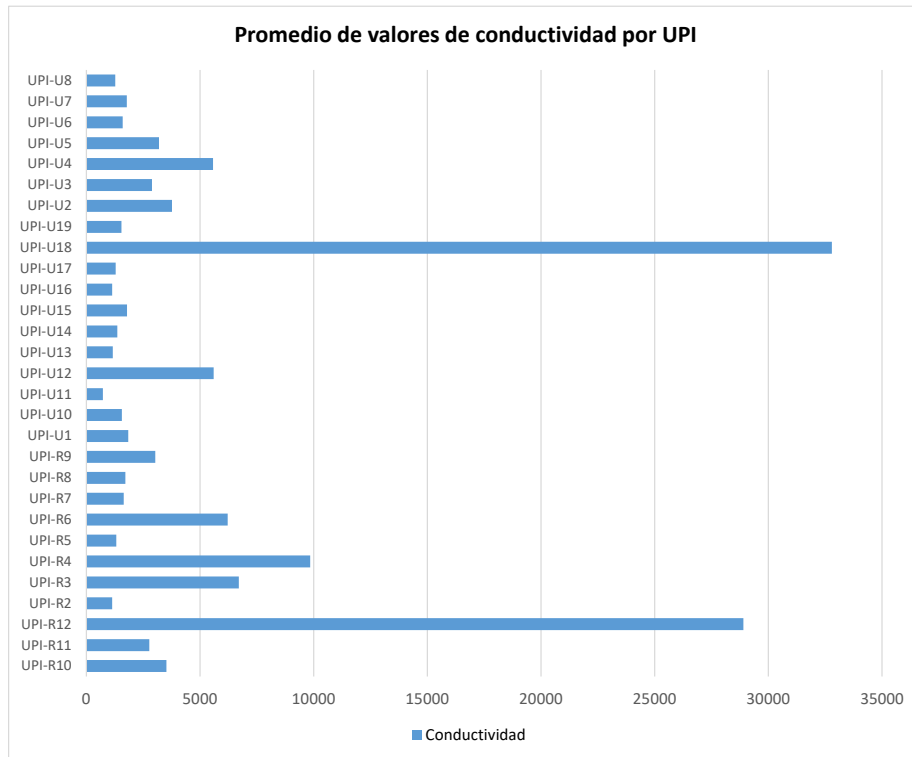
En cuanto a las UPI's urbanas, se aprecia que en su mayoría presentan valores por encima del máximo admisible por la normatividad de referencia, excepto la U11 cuyo registro (729 $\mu\text{S}/\text{cm}$) recae en un agua moderadamente dulce probablemente debido a que el acuífero en este lugar es de tipo colgante, es decir presenta un lente de agua dulce que le otorga esta característica. Se observa que la U18 posee una conductividad muy alta similar al agua de mar con un valor de 32800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ debido probablemente al fuerte efecto de intrusión salina en esta zona (**Grafica 2**).



Grafica 2. Promedio de valores de conductividad eléctrica por UPI's urbanas
Fuente: Propia

El promedio general en todas las UPI's analizadas es de 4098 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondiente a una categoría de moderadamente salobre según la clasificación de W. de Breack, 1991, con un mínimo de 729 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la UPI U11 y un máximo de 32800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la UPI U18. Sin embargo, se observa que la mayoría de UPI's evaluadas no sobrepasan valores de conductividad eléctrica de 3800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponde a aguas catalogadas como moderadamente salobres, lo cual es un resultado esperado por las condiciones típicas del ambiente costero insular (**Grafica 3**).





Grafica 3. Promedio de valores de conductividad eléctrica por UPI
Fuente: Propia



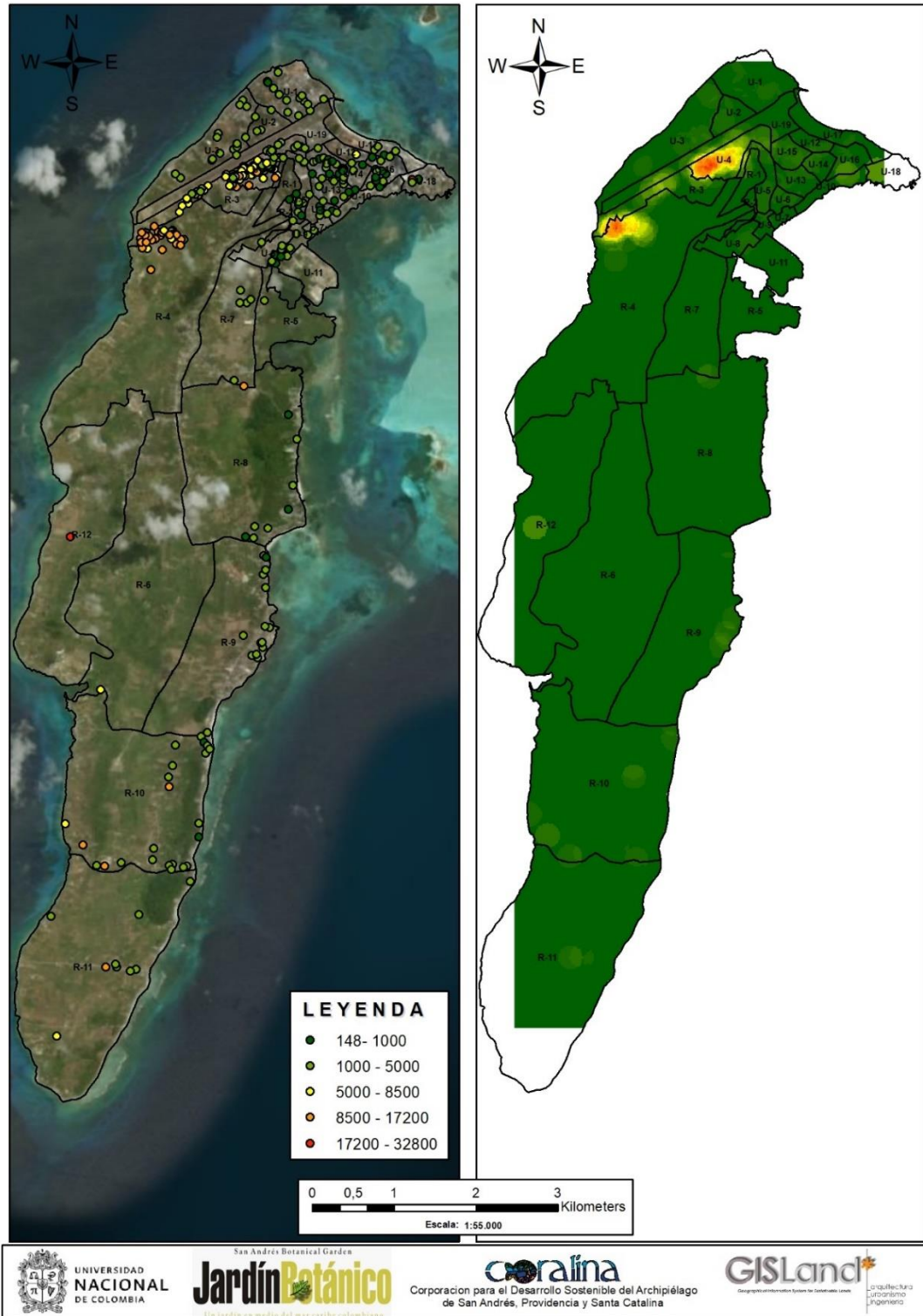
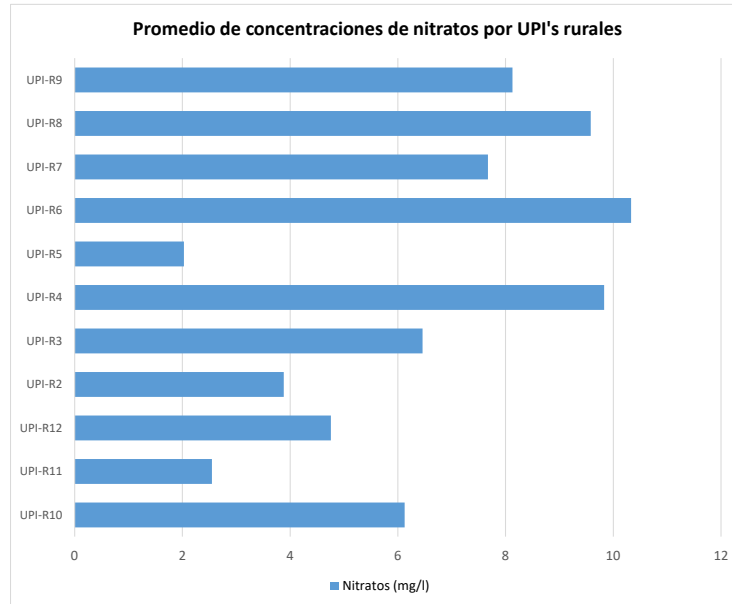


Figura 6. Conductividad eléctrica
Fuente: Propia

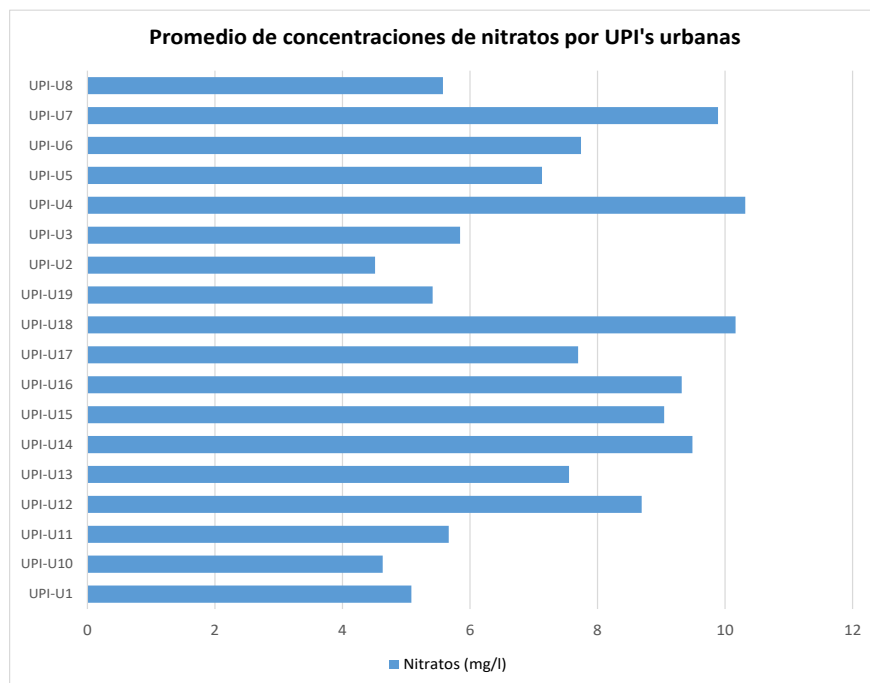
4.3.1.2. Nitratos

Se puede observar en primera instancia que las UPI's rurales presentan en su mayoría valores por debajo del máximo admisible (10 mg/l) excepto la R6 que posee un valor de 10,3 mg/l (**Grafica 4**). En el caso de las UPI's urbanas, casi todas presentan valores por debajo de lo establecido, sin embargo, existe un ligero aumento con respecto al valor de referencia para las UPI's U4 y U18 (**Grafica 5**).



Grafica 4. Promedio de concentraciones de nitratos en UPI's rurales
Fuente: Propia

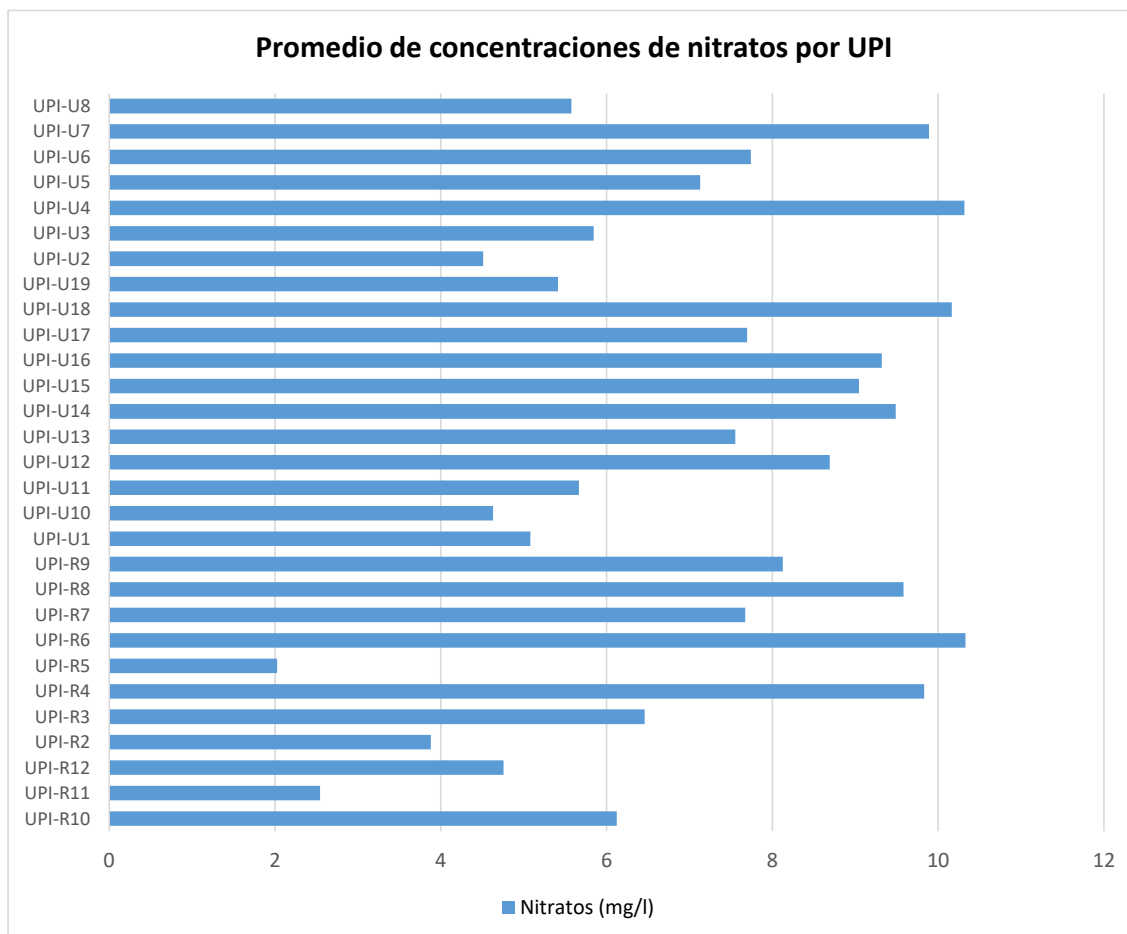




Grafica 5. Promedio de concentraciones de nitratos en UPI's urbanas
Fuente: Propia

El promedio general de la concentración de nitratos corresponde a 7,9 mg/l, valor que se encuentra dentro del límite aceptable (10 mg/l) según la Resolución 2115 de 2007 y en este sentido, los promedios de la mayoría de UPI's evaluadas también están dentro de este valor, a excepción de algunas UPI's mencionadas anteriormente cuyas concentraciones no se alejan notablemente de la referencia y posiblemente sean atribuibles a zonas con alta densidad poblacional en el caso urbano y con influencia de aguas contaminadas por el uso de fertilizantes en la zona rural (**Grafica 6**).





Grafica 6. Promedio de concentraciones de nitratos por UPI
Fuente: Propia

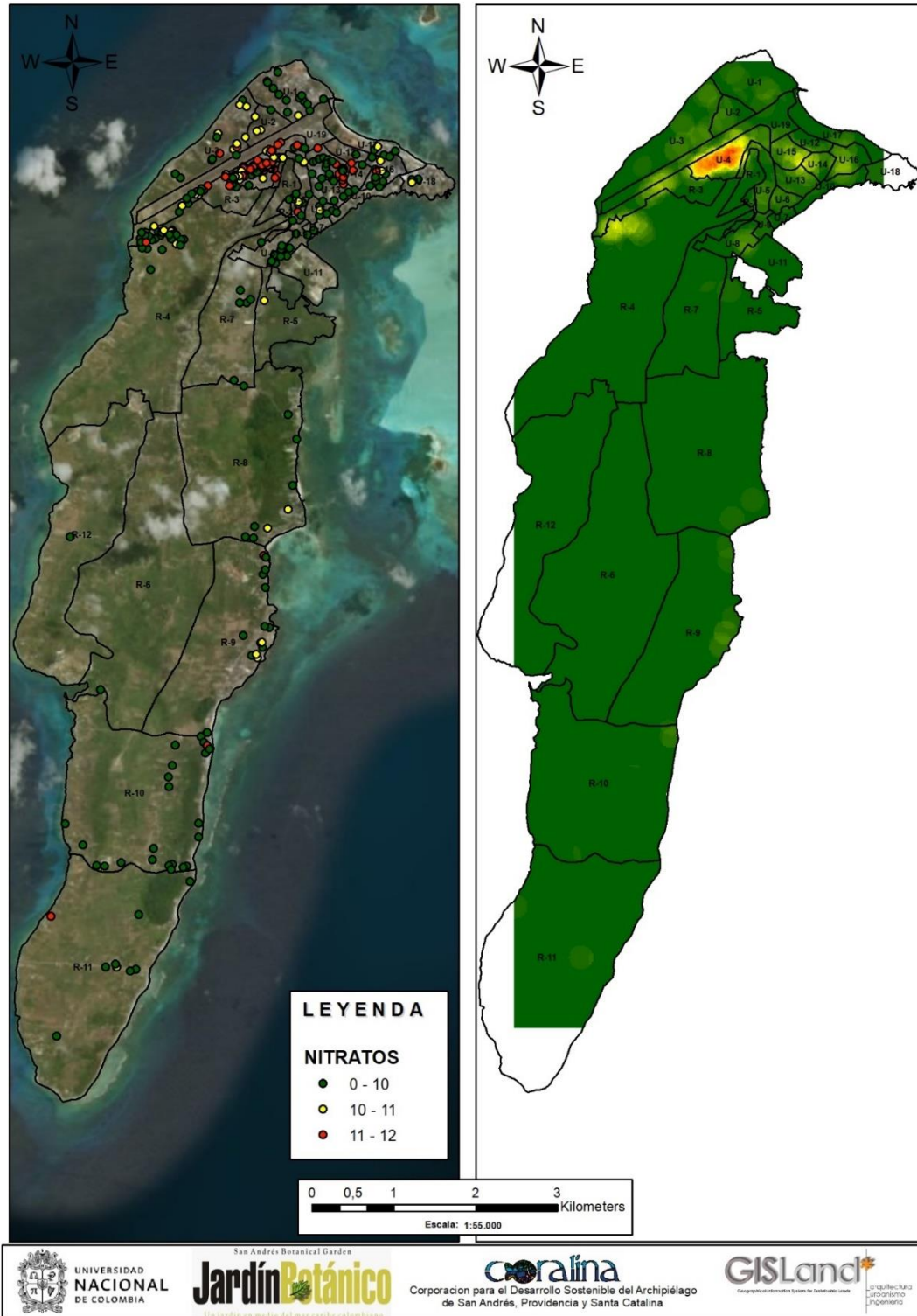
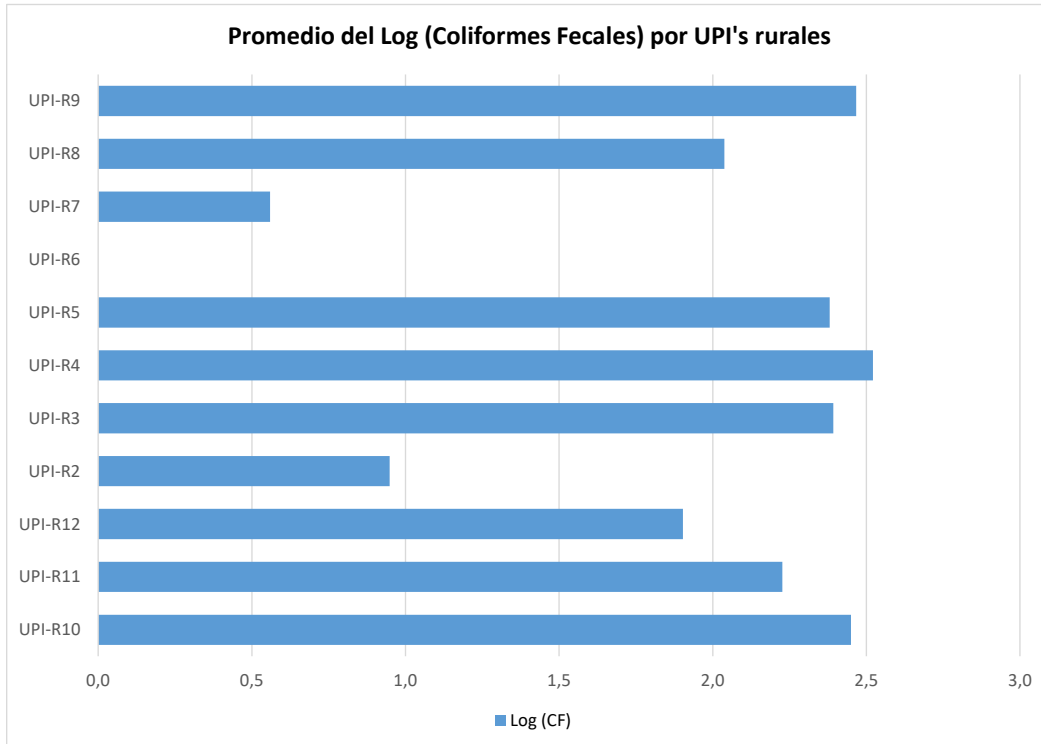


Figura 7. Nitratos
Fuente: Propia

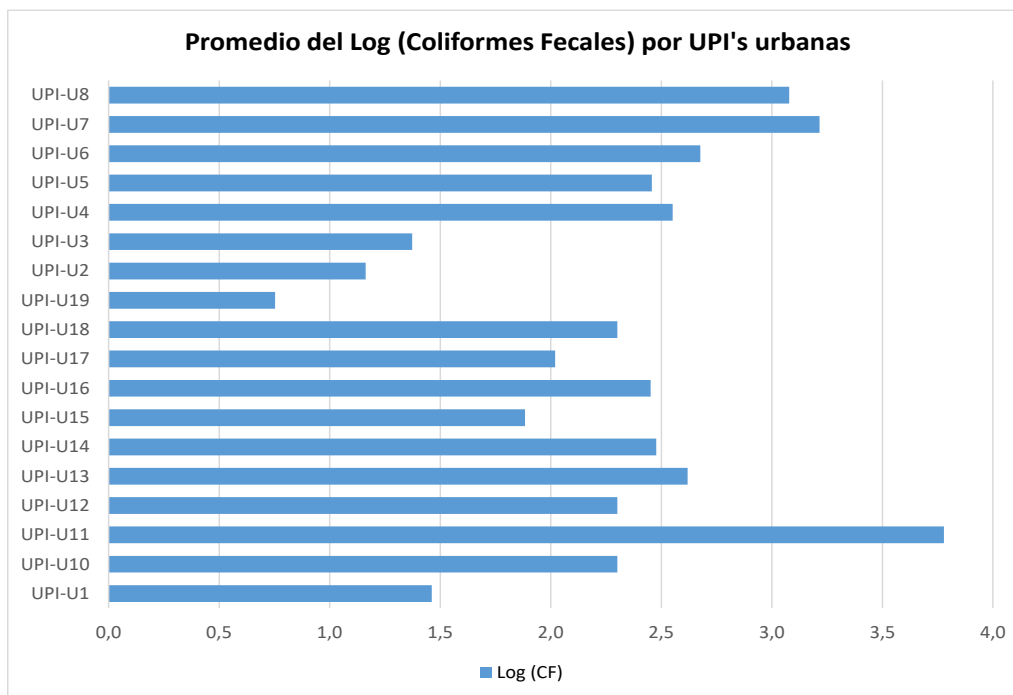
4.3.1.3. Coliformes fecales

Las colimetrías fecales arrojan en las UPI's rurales densidades considerables de esta clase de bacterias que indican influencia de heces fecales humanas (**Grafica 7**), mientras que en la UPI's R6 presenta ausencia del microorganismos de origen fecal. En todas las UPI's urbanas se observa presencia de coliformes fecales lo cual puede ser atribuido a contaminación en los pozos por infiltración u otros factores (**Grafica 8**).



Grafica 7. Promedio del Log (Coliformes Fecales) por UPI's rurales
Fuente: Propia

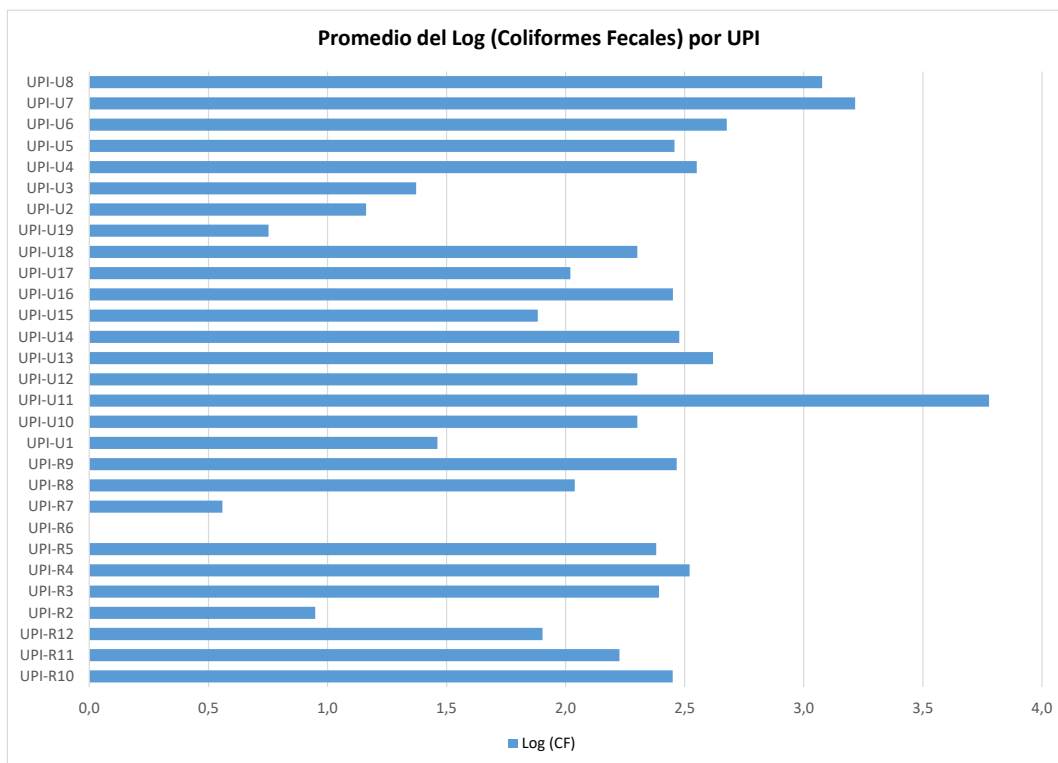




Grafica 8. Promedio del Log (Coliformes Fecales) por UPI's urbanas
Fuente: Propia



Adicionalmente, los resultados arrojan un promedio general en logaritmo ⁽¹⁰⁾ de 2,3 unidades cuyo máximo valor corresponde a la UPI U11 (3,8 unidades), seguida de la U7 y U8 donde probablemente existen fuentes externas que están aportando bacterias indicadoras de contaminación al recurso subterráneo mediante la percolación de aguas residuales, heces fecales, desechos sólidos, entre otros, todo ello aunado en un ambiente bajo en sales disueltas (se encontró el menor valor en la conductividad eléctrica) que facilita la proliferación de esta clase de microorganismos (**Grafica 9**).



Grafica 9. Promedio del Log (Coliformes Fecales) por UPI
Fuente: Propia

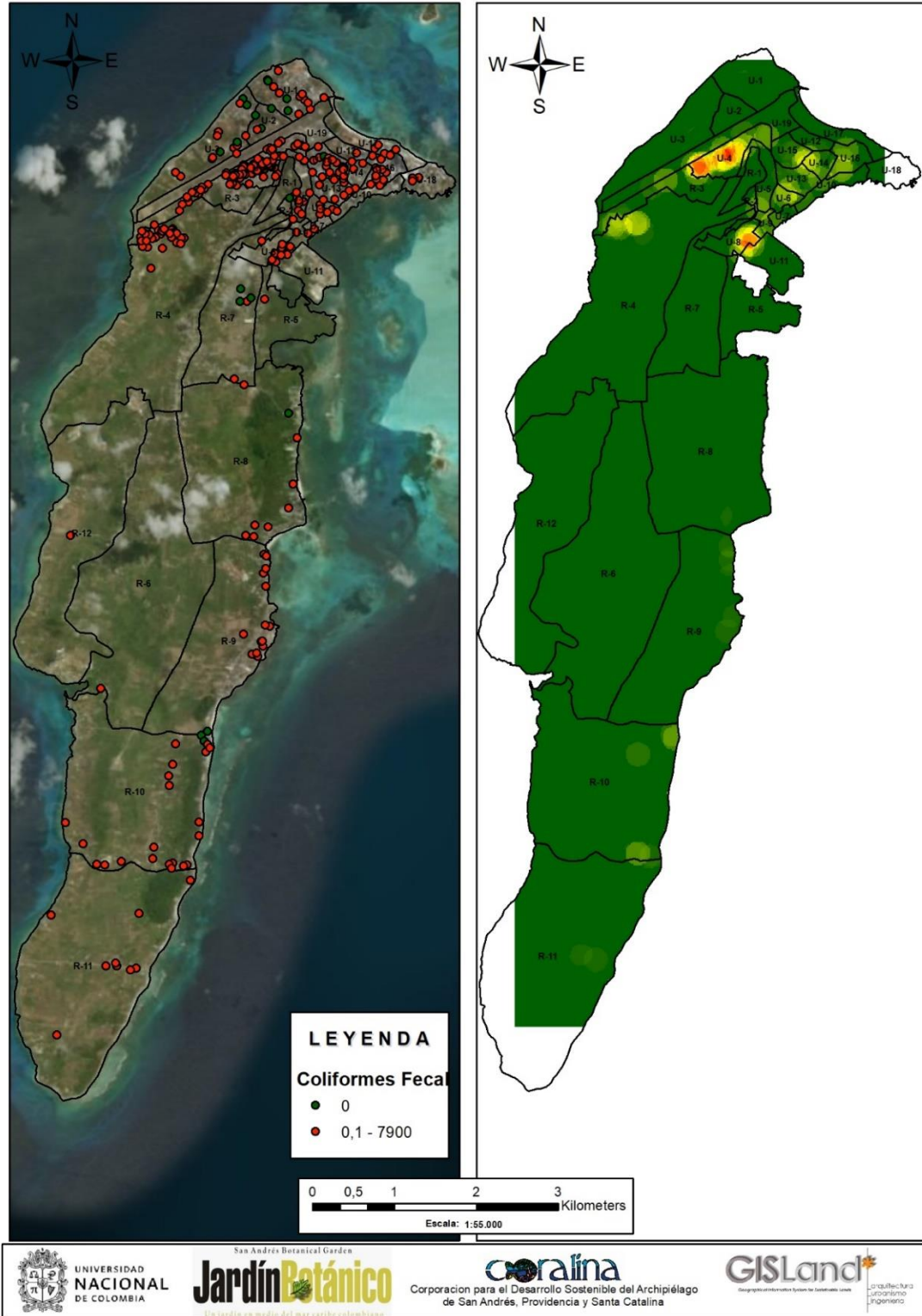
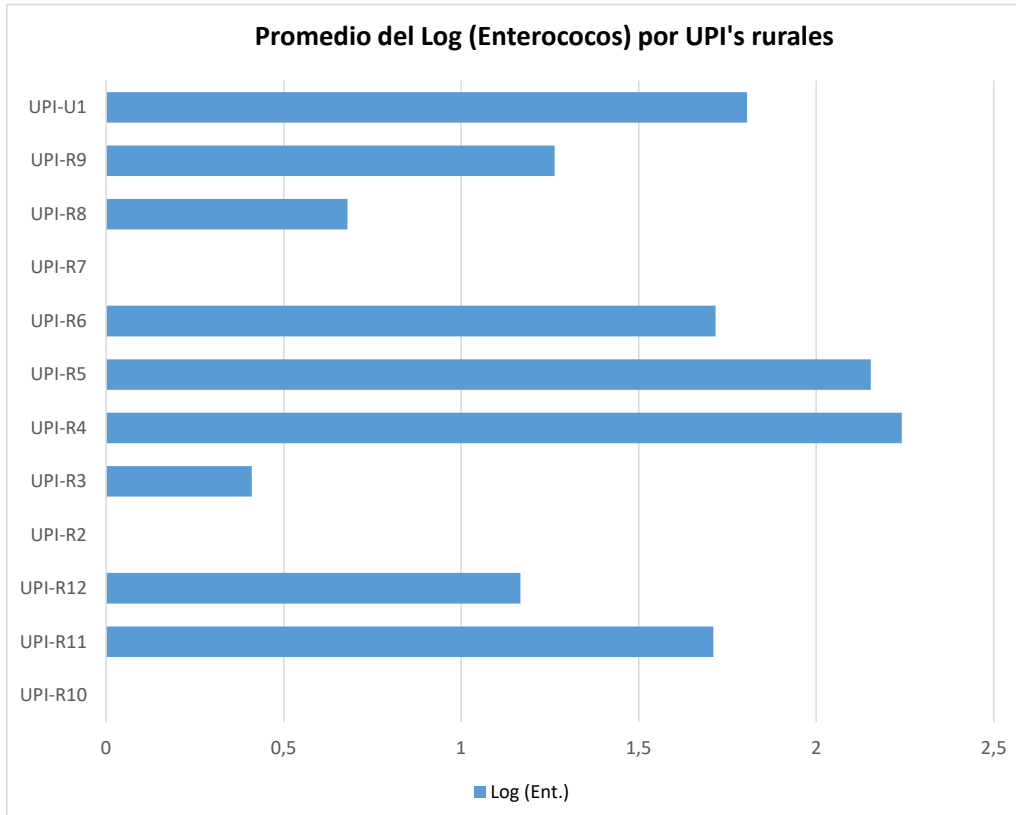


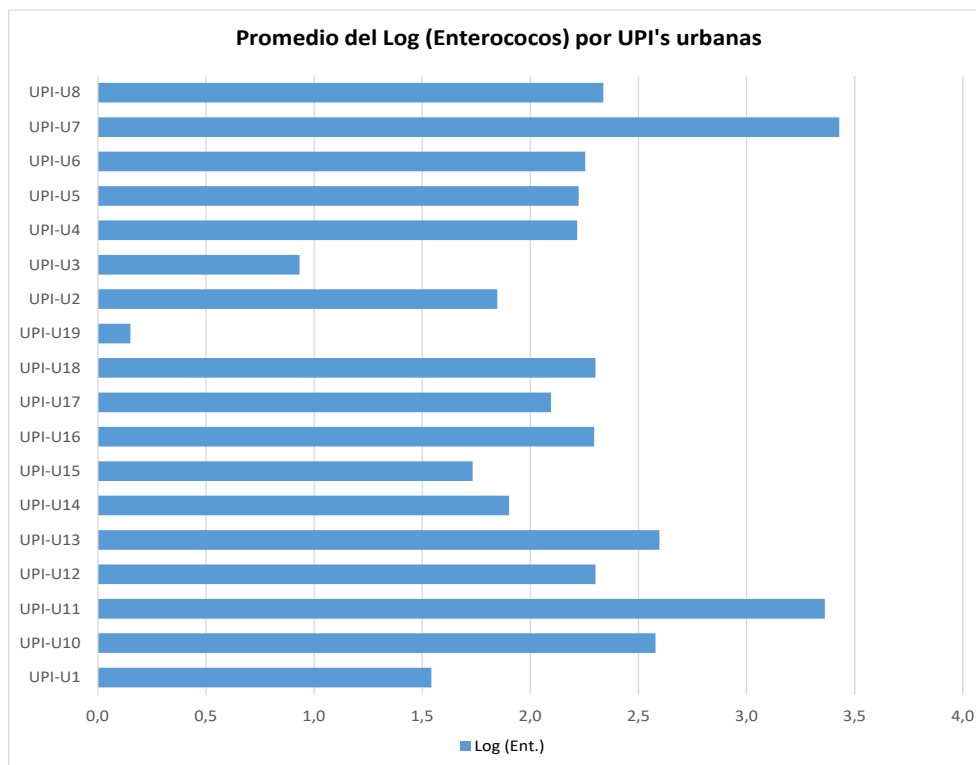
Figura 8. Coliformes fecales
Fuente: Propia

4.3.1.4. Enterococos

No se detectaron densidades en las UPI's R6 y R12, por lo que se puede inferir que, en estos sitios, las aguas subterráneas no tienen aportes de heces fecales de origen animal (**Grafica 10**). Mientras que en las UPI's urbanas se observa presencia de este tipo de bacterias en todas las unidades de planificación lo cual indica la influencia de heces de otros animales de sangre caliente sobre el recurso subterráneo (**Grafica 11**).

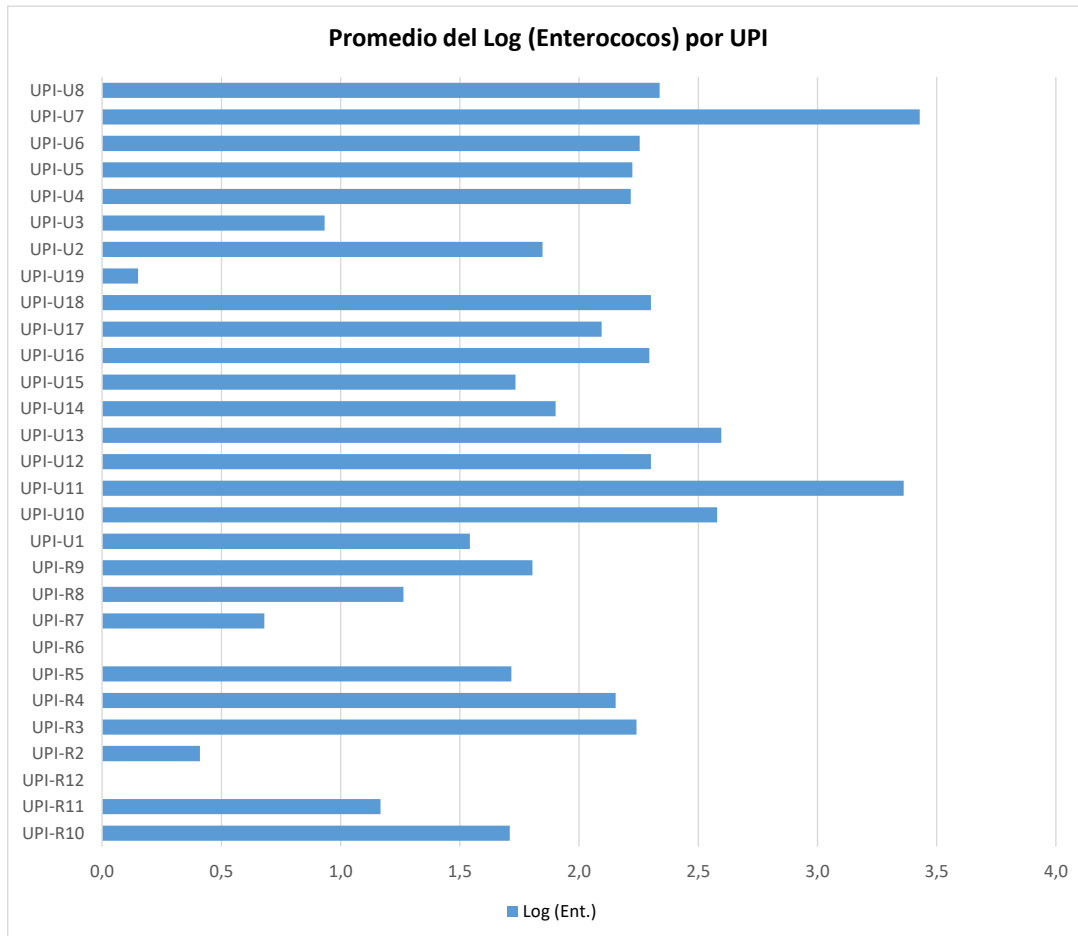


Grafica 10. Promedio del Log (Enterococos) por UPI's rurales
Fuente: Propia



Grafica 11. Promedio del Log (Enterococos) por UPI's urbanas
Fuente: Propia

Las densidades de bacterias tipo enterococos presentan un promedio en logaritmo ⁽¹⁰⁾ de 1,9 unidades, valor ligeramente más bajo que los coliformes fecales, pero en términos generales su comportamiento es similar ya que las densidades más altas corresponden a la UPI U11 y U7 (**Grafica 12**).



Grafica 12. Promedio del Log (Enterococos) por UPI
Fuente: Propia

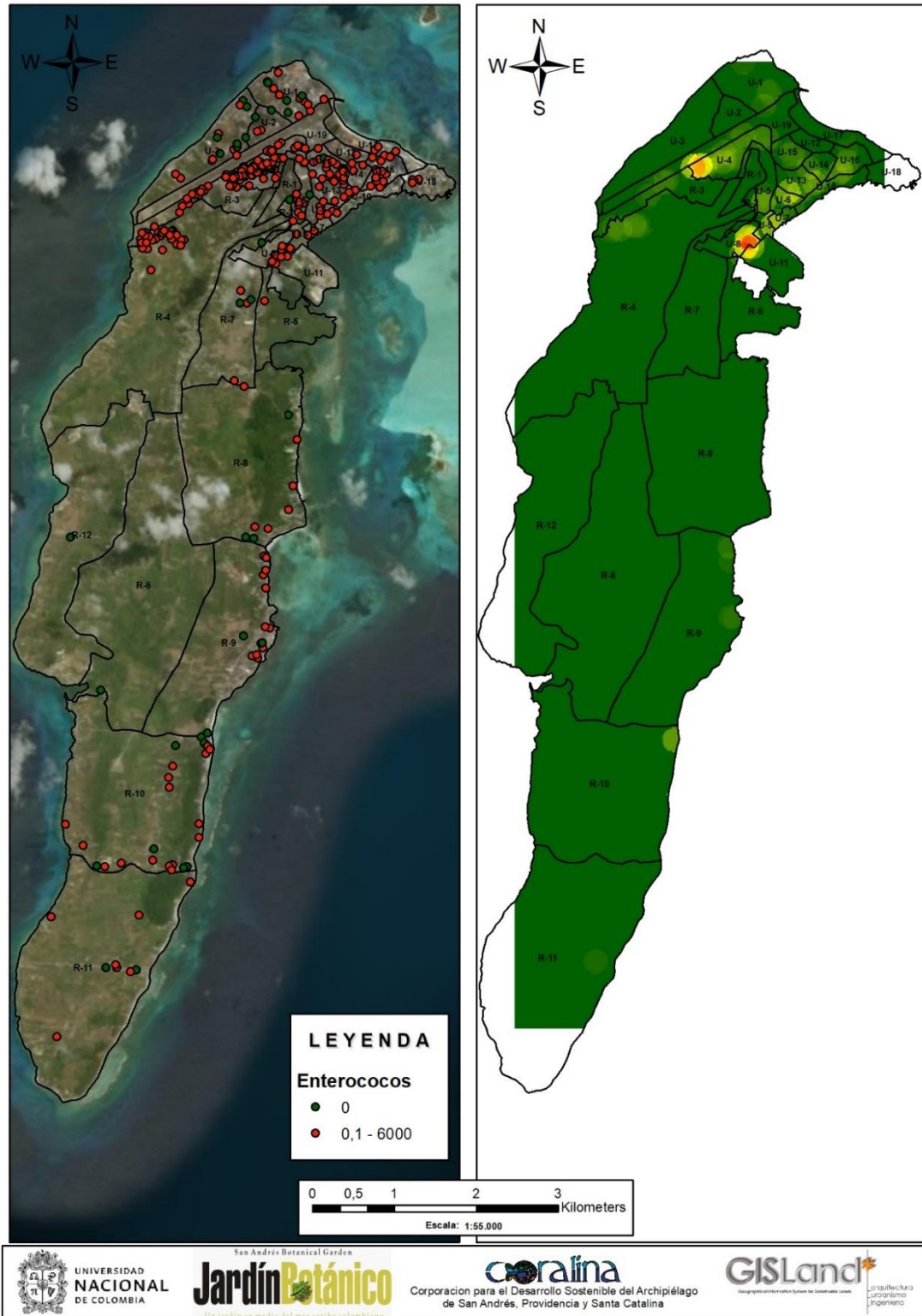


Figura 9. Enterococos
Fuente: Propia

4.3.2. Escala de valoración vs calidad del agua

Aplicando la metodología descrita anteriormente donde se suman únicamente los pesos de importancia de los parámetros que superan el límite máximo admisible y su comparación con la escala, se obtiene el porcentaje de valoración de la calidad en los pozos analizados en cada una de las UPI's.

En la **Grafica 13** se detalla el porcentaje de la valoración de la calidad de todos los pozos analizados en este estudio, obteniéndose que un 93,1% presentan una calidad baja- CB, mientras que sólo un 3,9% tiene calidad alta – CA y 3% de ellos, calidad media – CM.

Este resultado evidencia en general, la influencia de contaminantes químicos y sanitarios del medio exterior que llegan al agua subterránea deteriorando su calidad sea porque disminuye su disponibilidad para el uso doméstico y/o la hace susceptible de ser un medio de transmisión de enfermedades que pueden afectar la salud pública.



Grafica 13. Porcentaje de la valoración de la calidad de los pozos analizados.
Fuente: Propia

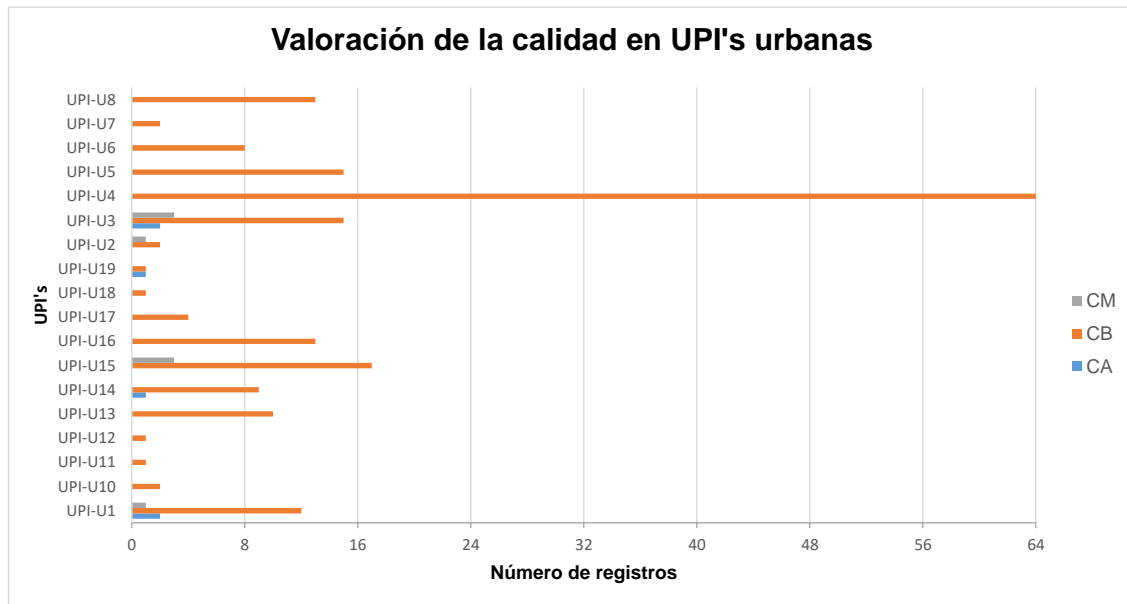
De igual manera, se realizó el análisis para determinar la calidad de los pozos evaluados por Unidad de Planificación Insular- UPI, encontrándose en las UPI's urbanas (**Grafica 14**) que la mayoría de pozos con CB corresponden a la U4, resultado que coincide con un estudio¹⁵ realizado paralelamente a este trabajo, donde esta zona arrojó la mayor cantidad de registros de los tensores contaminantes que están afectando el recurso subterráneo. Esto nos indica que esta UPI se convierte en un área importante para el seguimiento y control de las condiciones de las aguas subterráneas en la isla ya

¹⁵ Caracterización de la demanda, presiones por uso y tensores contaminantes de la explotación doméstica de agua subterránea en San Andrés por Unidad de Planificación Insular. GISLand- Holistic Consulting. 2018

que implícitamente tiene la mayor influencia de factores contaminantes sobre el recurso hídrico.

La U15 fue la segunda UPI que presentó el mayor registro con CB, lo cual refleja que esta zona presenta condiciones externas que aportan carga contaminante al recurso hídrico subterráneo en la mayoría de los pozos que allí se encuentran.

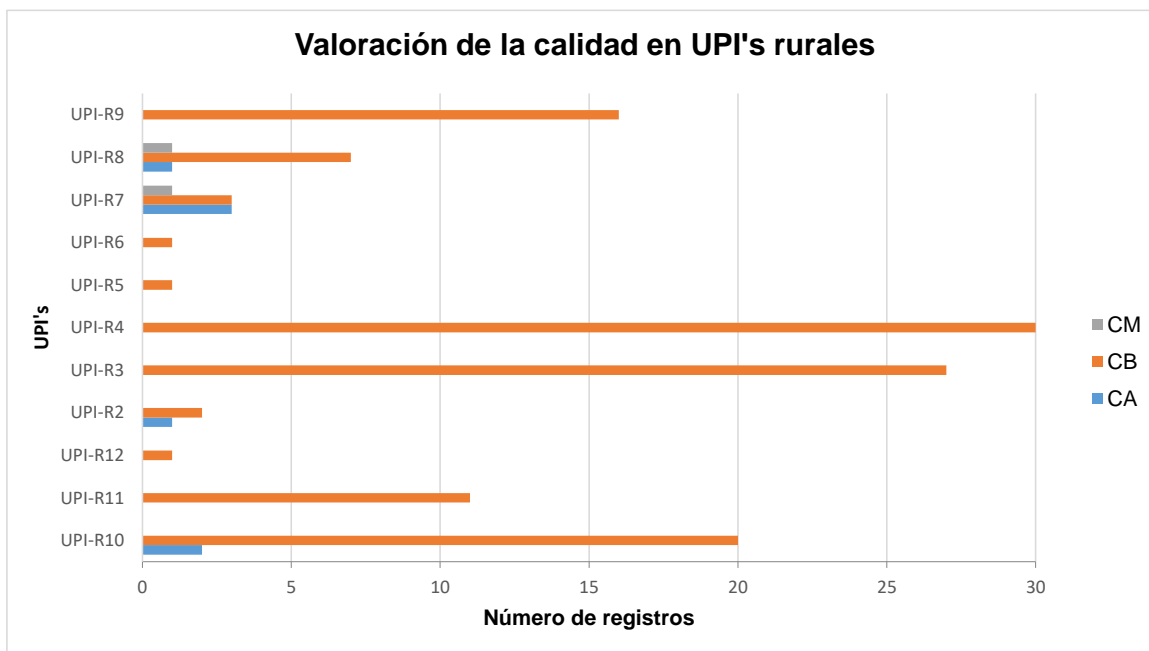
Las otras UPI's urbanas evaluadas presentan menores registros de pozos con CB, pero en su proporción la frecuencia es mayor que en las otras categorías de calidad. Es de anotar que sólo un número muy pequeño de pozos en algunas UPI's, presentaron registros con CA y CM al mismo tiempo.



Grafica 14. Valoración de la calidad en UPI's urbanas.
Fuente: Propia

En el caso de las UPI's rurales (**Grafica 15**) se observa que la R4 presenta el mayor número de registros para CB seguido de la R3 y R10, lo cual puede relacionarse a que estos lugares presentan influencia de sustancias nitrogenadas procedentes de actividades agrícolas y aporte de compuestos orgánicos en el caso de actividades antrópicas, ambos tipos de contaminación le otorgan carga química y biológica al recurso hídrico subterráneo. Similar a lo observado en las UPI's urbanas, se presentan pocos registros de pozos con valoración CA y CM simultáneamente, lo cual muestra que el recurso hídrico subterráneo es vulnerable a factores contaminantes que llegan relativamente fácil a la columna de agua deteriorando su calidad.





Grafica 15. Valoración de la calidad en UPI's rurales.
Fuente: Propia



5. INDICE DE RIESGO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO – IRCA MODIFICADO

5.1. Generalidades

Para el caso de este trabajo, se aplicó la metodología del índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano – IRCA modificado según la propuesta de CORALINA¹⁶.

Para efectos del cálculo del IRCA se tienen en cuenta aquellos parámetros que se encuentran en la Resolución 2115 de 2007, por esta razón las variables de grasas y aceites, dureza cálcica, dureza magnésica, salinidad, enterococos, conductividad, sólidos disueltos totales y temperatura no se incluyen.

A pesar de que el parámetro de nitritos se encuentra dentro de la Resolución mencionada anteriormente no fue empleado para el cálculo del IRCA por cuanto no hace parte del conjunto de parámetros considerados dentro de la propuesta de la entidad ambiental.

Los parámetros para el cálculo del IRCA fueron: pH, dureza total, cloruros, sulfatos, nitratos, coliformes totales y fecales. También se tuvieron en cuenta estas variables debido a su incidencia en la salud humana si se consume agua con concentraciones muy altas.



¹⁶ Propuesta de valoración de la calidad sanitaria del agua subterránea en la isla de San Andrés. Shelly P. 2010



Tabla 3. Cuadro de parámetros contaminantes.

Fuente: Environmental sampling and analysis for technicians. M. Csuros. 1994

Parámetro	Observaciones
Dureza total (aporte de calcio)	Concentraciones mayores a 60 mg/L. Exposición prolongada irritación en los ojos. El uso de más de 2,5 gramos de calcio por día sin una necesidad médica puede llevar a cabo el desarrollo de piedras en los riñones, esclerosis y problemas en los vasos sanguíneos. Fuentes: Carbonato calcio donde hay presencia de minas de yeso.
Dureza total (aporte de magnesio)	Concentraciones mayores a 36 mg/L. Los síntomas de esta fase son: indiferencia y apatía, somnolencia, pérdida de apetito, cefalea, vértigo y astenia. También pueden existir accesos de excitabilidad, dificultades para caminar y de coordinación, calambres y dolor de espalda. Si se ingieren grandes cantidades de polvo de magnesio, provocar el vómito. Fuentes: Oxidación - Filtración, Absorción en carbón activado.
Cloruros	Concentraciones mayores a 250 mg/L. Cambios en glándulas adrenales, Problemas circulatorios, hepáticos o del sistema nervioso, Alto riesgo de cáncer de hígado, Dificultades para la reproducción y Muy tóxico. Mal sabor al agua. Fuentes: percolado de tuberías de PVC; efluentes de fábricas de plásticos. Efluentes de fábricas de textiles, de productos químicos de uso industrial, para desgrasar metales y de otros tipos de plantas. Osmosis Inversa, Evaporación, Intercambio Iónico.
Sulfatos	Concentraciones mayores a 250 mg/L. El sulfato no produce trastornos tóxicos, salvo cuando la cantidad de sulfato de magnesio es alta, en cuyo caso le confiere propiedades laxantes. Fuentes: Depósitos naturales, minas de yeso (barita), caliza (relleno de cavidades en caliza). Intercambio Iónico u Osmosis Inversa.
Nitratos	Concentraciones mayores a 10 mg/L. Producción de nitrosaminas, las cuales son conocidas como una de las más comunes causas de cáncer. Dificultad respiratoria y síndrome de bebé cianótico (azul). Disminución del funcionamiento de la glándula tiroidea. Bajo almacenamiento de la vitamina A. Fuentes: Aguas contaminadas por el uso de fertilizantes; percolado de tanques sépticos y de redes de alcantarillado; erosión de depósitos naturales. Escorrentías urbanas y agrícolas. Con Ozono o Coagulación - Floculación - Sedimentación - Filtración o intercambio iónico.
Coliformes totales	(0 UFC/ 100 mL) Son microbios que provocan enfermedades (patógenos) y que están presentes en las heces, causan diarrea, retortijones, náuseas, cefaleas u otros síntomas. Estos patógenos podrían representar un riesgo de salud muy importante para bebés, niños pequeños y personas con sistemas inmunológicos gravemente comprometidos. Fuentes: Los Coliformes se presentan naturalmente en el medio ambiente.
Coliformes fecales	(0 UFC/ 100 mL) Proviene de heces fecales de humanos y de animales. Desinfección con cloro, ozono a por radiación de luz ultravioleta entre otros. Los síntomas principales son calambres o dolor de estómago y diarrea que puede aparecer como agua sanguinolenta. Fuentes: Aguas negras. Las bacterias son transmitidas al comer alimentos o tomar agua contaminada con excreta o heces de un animal o persona infectada.





5.2. Metodología

Los parámetros empleados son similares a la propuesta de la entidad ambiental¹⁷ excepto calcio y magnesio que fueron reemplazados por dureza total, el cual agrupa a ambos tipos de iones y la variable de alcalinidad que tampoco fue analizada en este estudio; por lo tanto, los puntajes de riesgo de los parámetros que no se tuvieron en cuenta para este ejercicio se redistribuyeron de forma equitativa entre los que si hacen parte del índice (**Tabla 4**).

Tabla 4. Parámetros y puntajes IRCA.
Fuente: Propia

Parámetro	Puntaje IRCA
Nitratos	7,81
Dureza total	14,64
Cloruros	7,81
Sulfatos	7,81
pH	8,31
Coliformes totales	21,81
Coliformes fecales	31,81
Total	100



La fórmula del IRCA utilizada en este caso fue la del IRCA por muestra, ya que se ajusta mejor al diseño del monitoreo de la red de calidad de agua subterránea por ser un muestreo puntual en el tiempo y espacio.

$$IRCA (\%) = \frac{\Sigma \text{ puntajes de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\Sigma \text{ puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} \times 100$$

El valor del IRCA es cero (0) puntos cuando cumple con los valores aceptables para cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas contempladas y cien puntos (100) para el más alto riesgo cuando no cumple ninguno de ellos.

Teniendo en cuenta los resultados del IRCA por muestra, se define la siguiente clasificación del nivel de riesgo del agua subterránea analizada según lo establecido en la Resolución 2115 de 2007 (**Tabla 5**).

¹⁷ *Ibíd.*



Tabla 5. Clasificación nivel de riesgo según el IRCA por muestra.
Fuente: Resolución 2115 de 2007

Clasificación IRCA (%)	Nivel de riesgo
80.1 -100	Inviabile sanitariamente
35.1 - 80	Alto
14.1 - 35	Medio
5.1 - 14	Bajo
0 - 5	Sin riesgo

La escala de valores nos indica un gradiente determinado para la cuantificación de diferentes variables que, en conjunto, muestran la calidad del recurso y gracias al análisis geoestadístico se puede identificar a nivel espacial, los diferentes niveles de contaminación de cada sector, así como las UPI's que presentan los valores más críticos.

En el presente estudio el análisis espacial busca comparar el estado del acuífero de acuerdo al índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano – IRCA modificado y radio CF/E. En este sentido se analizaron los patrones espaciales que nos pudieran mostrar áreas con valores altos de vulnerabilidad y su influencia sobre sus alrededores, determinando un comportamiento de dispersión o agregación de los resultados puntuales en cada UPI.

La herramienta utilizada para el análisis geoestadístico es el “IDW” (Distancia Inversa Ponderada) la cual limita el rango de valores utilizados para la interpolación. Dado que la IDW es un promedio de distancia ponderado, el promedio no puede ser mayor que el valor máximo o mínimo registrado. Por lo tanto, no puede crear asociaciones en las áreas donde no existen pozos¹⁸. La influencia de cada registro sobre un valor interpolado es isotrópica.

El geoestadístico IDW se encuentra disponible en la mayoría de los programas de sistemas de información geográfica SIG¹⁹ y su definición formal es²⁰:

$$\hat{e}_c = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n p_{mc} e_m$$

Donde \hat{e}_c es la elevación calculada para la celda c utilizando n muestras de la variable de interés; e_m es el valor de las muestras de cada variable; y p_{mc} es el peso (o influencia) entre 0 y 1 asignado a cada muestra, calculado como:

¹⁸ Watson, D.F. and Philip, G.M. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. Geoprocessing, 2, 315-327. 1985

¹⁹ Pérez Vega, A. y J.-F. Mas. “Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación”, Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 69, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 53-67. 2009

²⁰ O'Sullivan, D. and D. J. Unwin. Geographic Information Analysis, Wiley, Nueva Jersey. 2003.





$$p_{mc} = \frac{1}{d_{mc}}$$

donde d_{mc} es la distancia euclidiana entre la muestra de elevación m y el centro de la celda c de la malla. Opcionalmente, con el fin de mejorar resultados, es común utilizar un exponente a para disminuir la influencia de las muestras conforme se incrementa la distancia²¹:

$$p_{mc} = \frac{1}{d_{mc}^a}$$

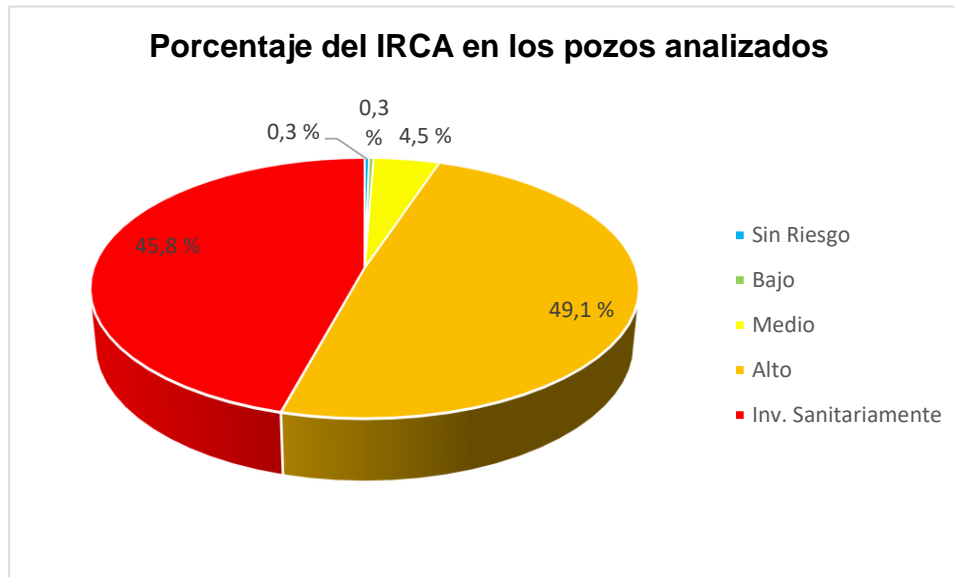


5.3. Cálculo del IRCA

Con respecto al cálculo del IRCA por muestra, es decir por cada uno de los pozos analizados, se puede observar (**Grafica 16**) que el mayor porcentaje de pozos presentan un riesgo alto (49,1%), seguido de un valor similar de pozos que recaen en un riesgo inviable sanitariamente (45,8%), es decir en ambos casos, el recurso subterráneo posee condiciones químicas y microbiológicas que pueden causar afectación a la salud humana cuando el agua es empleada para consumo humano y doméstico en actividades tales como bebida directa, preparación de alimentos, higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.

Un porcentaje de riesgo medio se presenta en un 4,5% de los pozos analizados y valores de 0,3% se encontraron en pozos cuyos IRCA's recaen en la escala de bajo y sin riesgo. Con estos resultados, se evidencia que la mayoría de pozos analizados están siendo influenciados por tensores, factores o procesos como escorrentías, presencia de heces humanas, heces de otros animales de sangre caliente, vertimientos, presencia de residuos sólidos, intrusión salina, entre otros, que aportan contaminantes orgánicos e inorgánicos deteriorando su estado natural y disminuyendo su uso en actividades varias.

²¹ Bosque Sendra, J. Sistemas de Información Geográfica, Ediciones Rialp, Madrid. 2000.



Grafica 16. Porcentaje del IRCA en los pozos analizados.
Fuente: Propia



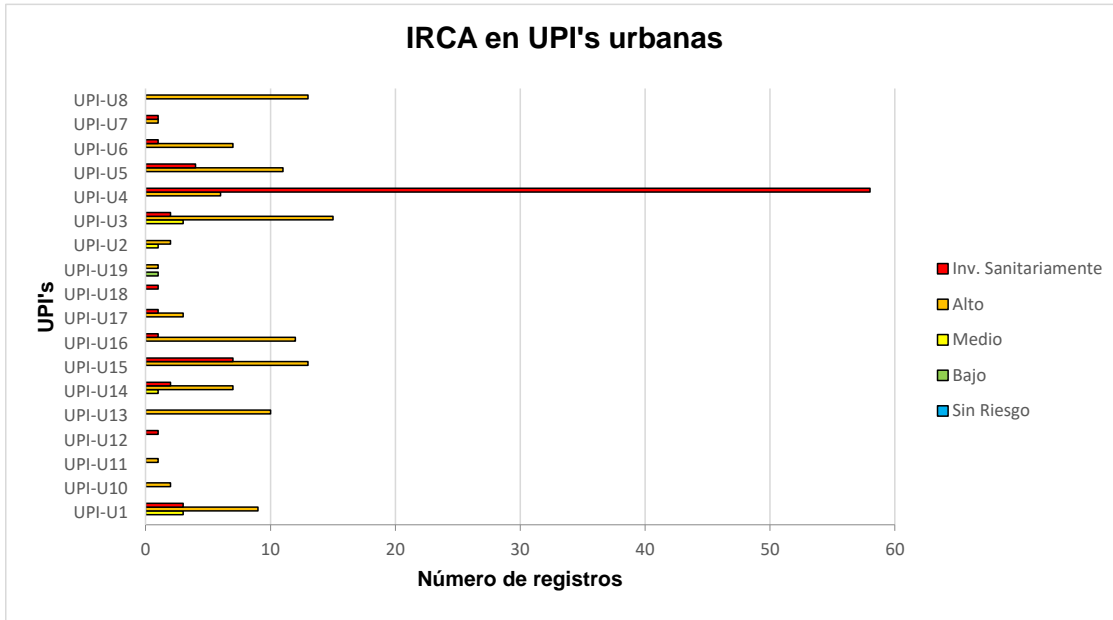
De otro lado, se llevó a cabo el análisis para determinar el IRCA por cada tipo de UPI, observándose en las urbanas que el mayor registro corresponde a la U4, seguido de la U15, ambos con un riesgo inviable sanitariamente, lo cual coincide con lo arrojado en la metodología de escala de valoración de la calidad propuesta en el ítem 4.3.2, donde también se encontraron estas UPI's con las mayores frecuencias en la categoría CB (**Grafica 17 y Tabla 6**).

Este hecho demuestra que ambas metodologías pese a que poseen diferentes grados de valoración de la calidad y variabilidad en los parámetros, concuerdan en el hallazgo del alto grado de contaminación que existe principalmente en la UPI U4 y U15 corroborando una vez más que la influencia de tensores que traen consigo deterioro de la calidad en el recurso hídrico subterráneo en estas zonas es de larga duración y alta magnitud.

Los registros encontrados con un IRCA de riesgo alto corresponden a la U3, U15 y U13 respectivamente, caracterizándose estos sitios por ser zonas densamente pobladas cuyas actividades impactan negativamente el recurso hídrico subterráneo, aunado a que sobre estas UPI's yace el acuífero San Luis con una vulnerabilidad catalogada como extrema²², facilitando de esta manera la entrada de contaminantes al cuerpo de agua. Los demás registros presentan frecuencias muy bajas categorizadas en riesgo medio y bajo, sin detectarse ningún pozo en categoría "sin riesgo" (**Grafica 17**).

²² SIG de zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la isla de San Andrés. Liane G.





Grafica 17. IRCA en UPI's urbanas.
Fuente: Propia



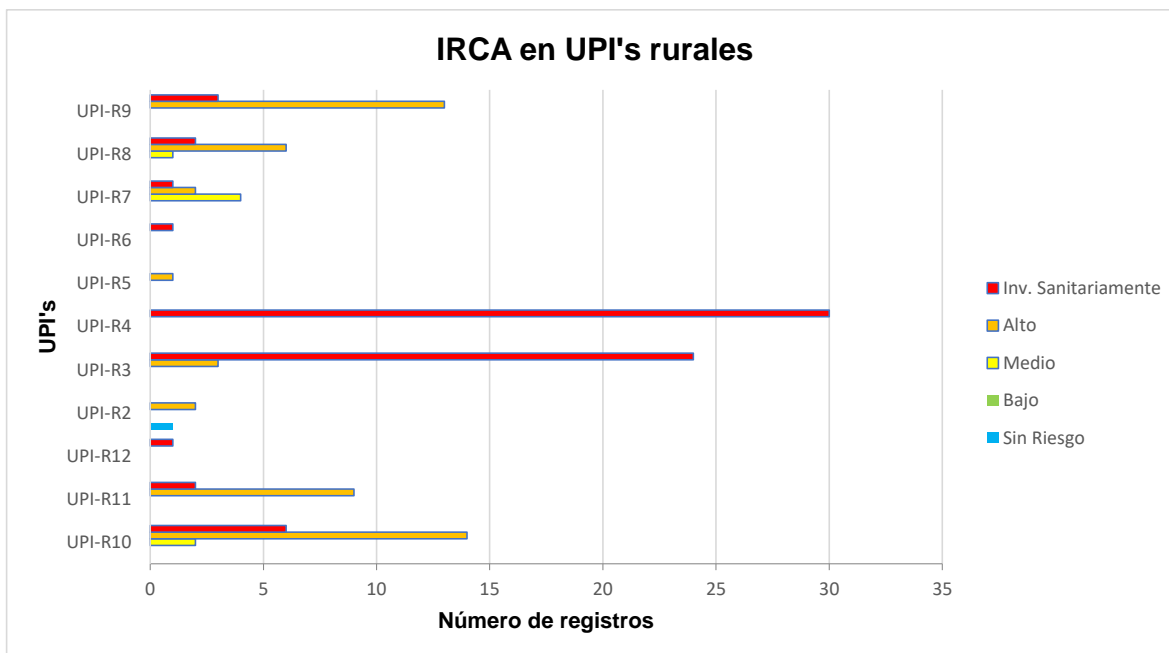
Tabla 6. Clasificación del riesgo según IRCA UPI's urbanas
Fuente: Propia

UPI	CLASIFICACION DEL RIESGO SEGÚN IRCA				
	Sin Riesgo	Bajo	Medio	Alto	Inv. Sanitariamente
UPI-U1			3	9	3
UPI-U10				2	
UPI-U11				1	
UPI-U12					1
UPI-U13				10	
UPI-U14			1	7	2
UPI-U15				13	7
UPI-U16				12	1
UPI-U17				3	1
UPI-U18					1
UPI-U19		1		1	
UPI-U2			1	2	
UPI-U3			3	15	2
UPI-U4				6	58
UPI-U5				11	4
UPI-U6				7	1
UPI-U7				1	1
UPI-U8				13	



Con respecto a las UPI's rurales (**Grafica 18 y Tabla 7**) se observa que la R4, R3 y R10 presentan en orden decreciente, los más altos registros de IRCA para la categoría inviable sanitariamente; este resultado coincide con lo encontrado en la escala de valoración propuesta donde se detectaron las más altas frecuencias en estas UPI's con CB, así las cosas al igual que lo ocurrido en las UPI's urbanas, se evidencian los mismos resultados entre las metodologías empleadas en este estudio con la identificación de las UPI's fuertemente influenciadas por factores contaminantes que afectan la calidad del recurso hídrico subterráneo.

Las UPI's R10, R9 y R11 arrojan registros de IRCA que recaen en la categoría alto, resultado que puede atribuirse a actividades agropecuarias, porcícolas y ganaderas desarrolladas en estas zonas y su influencia por el uso de sustancias químicas nitrogenadas, presencia de heces humanas, heces de otros animales de sangre caliente y compuestos orgánicos en general, que logran llegar a la columna de agua deteriorando el recurso (**Grafica 18**).



Grafica 18. IRCA en UPI's rurales.
Fuente: Propia

Tabla 7. Clasificación del riesgo según IRCA UPI's rurales
Fuente: Propia

UPI	CLASIFICACION DEL RIESGO SEGÚN IRCA				
	Sin Riesgo	Bajo	Medio	Alto	Inv. Sanitariamente
UPI-R10			2	14	6
UPI-R11				9	2
UPI-R12					1
UPI-R2	1			2	
UPI-R3				3	24
UPI-R4					30
UPI-R5				1	
UPI-R6					1
UPI-R7			4	2	1
UPI-R8			1	6	2
UPI-R9				13	3



5.4. Análisis geoestadístico del IRCA

En este tipo de análisis se observa claramente para las UPI's urbanas, la mayor incidencia del grado del IRCA que arroja riesgo inviable sanitariamente en la mayoría de los pozos de la U4, también se evidencia en la U19 esta tendencia, lo cual se atribuye a la alta densidad poblacional que se asienta en estos lugares. Así mismo, se registra que las demás UPI's urbanas presentan casi en su totalidad riesgo alto con algunas zonas puntuales de riesgo medio (**Figura 6**).

Algunos pozos ubicados en el costado occidental de las UPI's R4, R10, R11 y R12 muestran resultados de IRCA con riesgo inviable sanitariamente, en cambio los pozos que se ubican hacia el lado oriental de estas mismas UPI's presentan un IRCA con riesgo alto. Este fenómeno también ocurre en las UPI's situadas propiamente en el lado oriental de la isla cuyos resultados arrojan un IRCA con riesgo alto y algunas excepciones con riesgo medio. Por otra parte, es de anotar que la UPI R6 que yace sobre el acuífero San Andrés presenta riesgo alto (**Figura 7**).

En términos generales en la **Figura 8** se observa que en las UPI's urbanas la mayoría de resultados arroja un IRCA inviable sanitariamente y alto. La zona rural presenta riesgo inviable sanitariamente para algunos pozos ubicados en el costado occidental de las UPI's R4, R10, R11 y R12 y a medida que se acerca a la parte oriental, los resultados del IRCA arrojan un riesgo alto con algunas excepciones puntuales de riesgo medio. Esto nos indica que el acuífero San Luís presenta la mayor vulnerabilidad en cuanto a contaminación general se refiere.



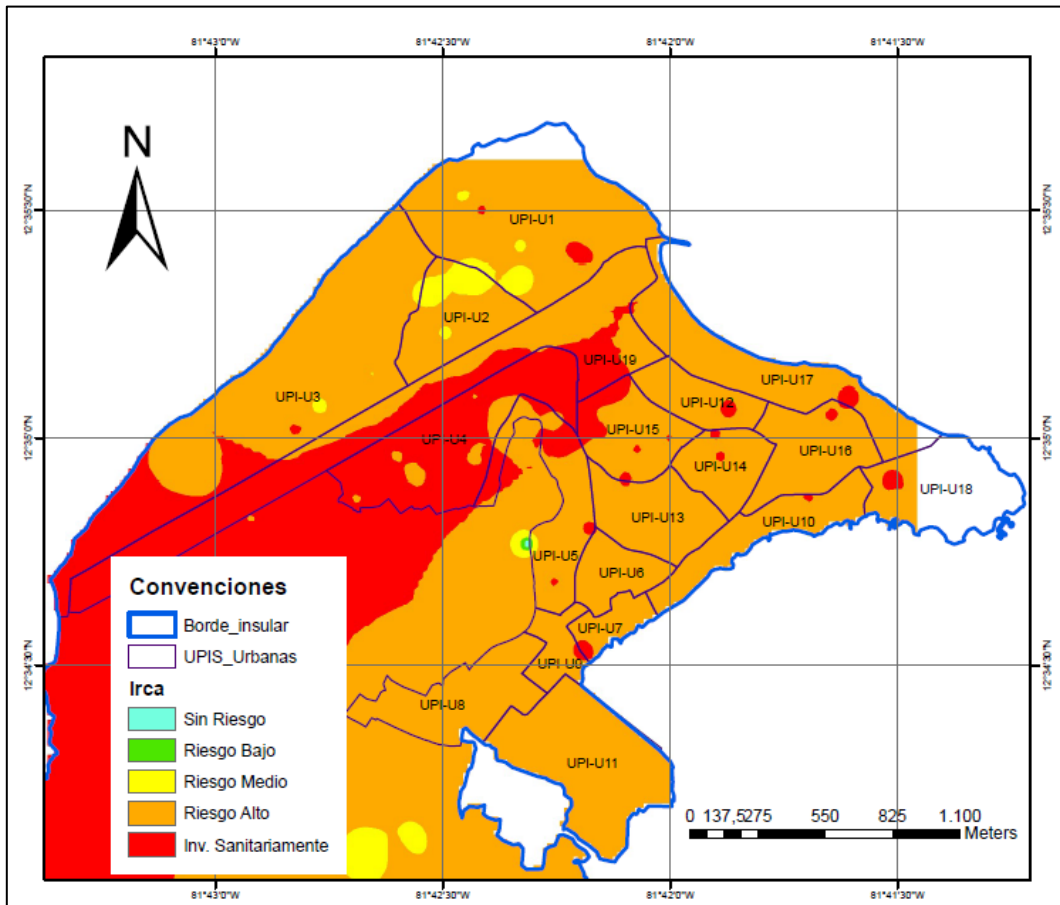


Figura 10. Análisis geoestadístico IDW para el IRCA en las UPI's urbanas
Fuente: Propia.

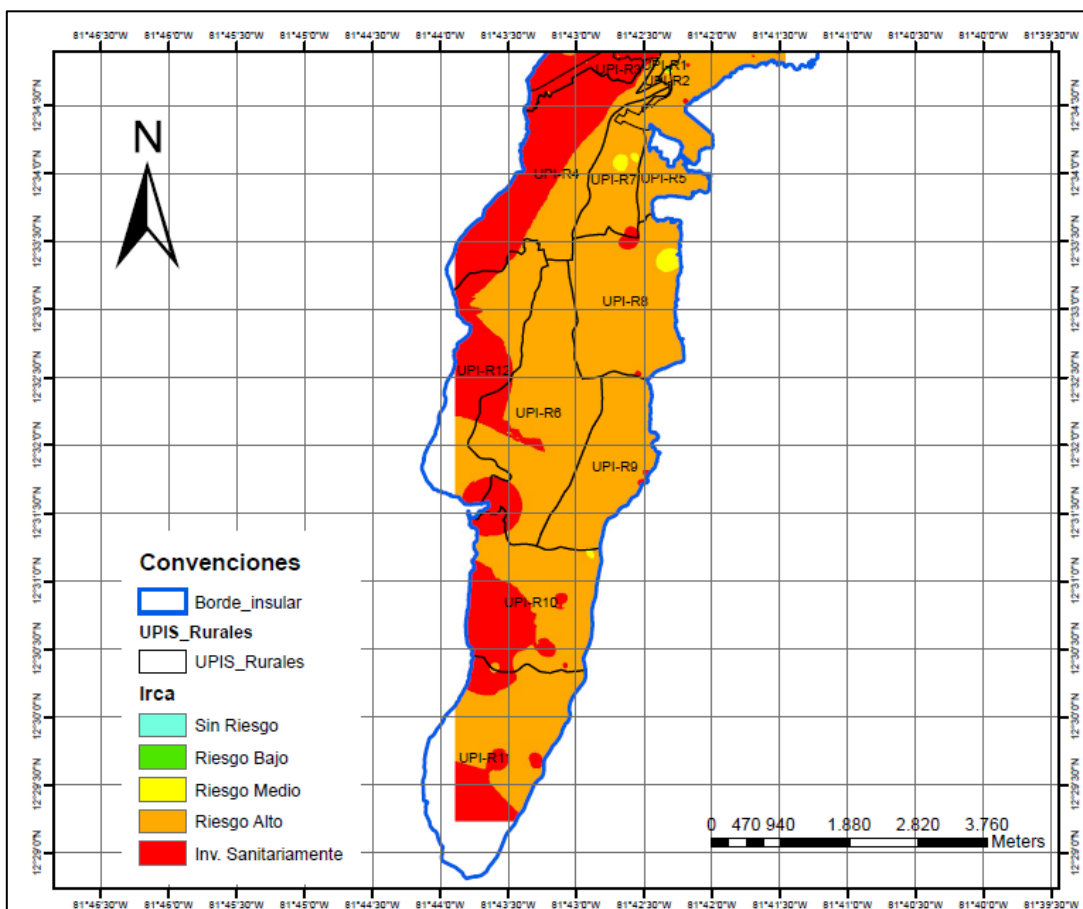


Figura 11. Análisis geoestadístico IDW para el IRCA en las UPI's rurales
Fuente: Propia.

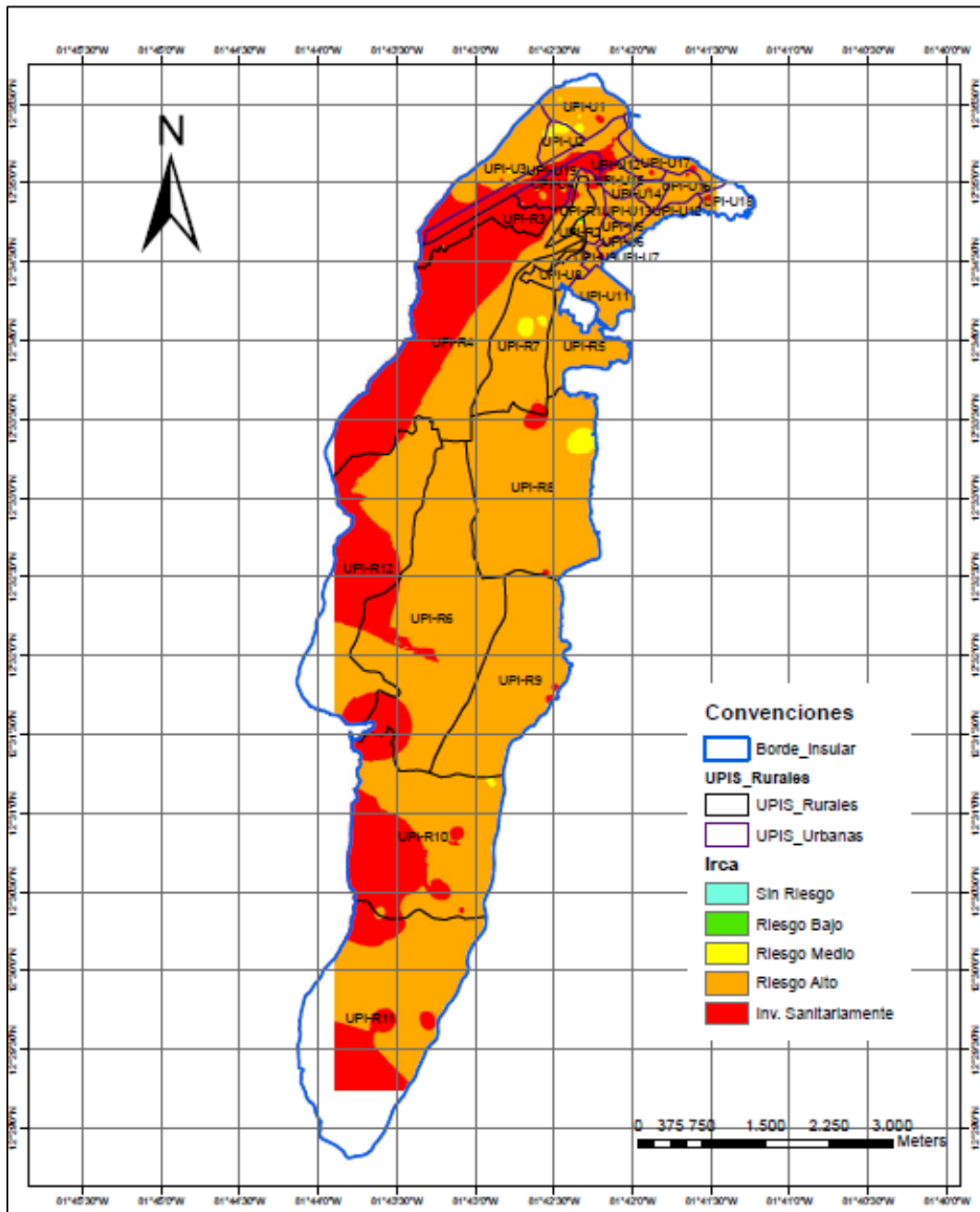


Figura 12. Análisis geoestadístico IDW para el IRCA en las UPI's
Fuente: Propia.



6. RELACION COLIFORMES FECALES VS ENTEROCOCOS

6.1. Generalidades

Los coliformes termotolerantes o también llamados fecales- CF y los enterococos-E son los indicadores más apropiados para determinar la presencia de contaminación de origen fecal en los cuerpos de agua²³. El empleo de la relación (CF/E) puede ser de gran utilidad para la determinación del origen humano o animal de la contaminación fecal. Se ha sugerido que las cantidades de coliformes fecales y enterococos que son descargados por los seres humanos son significativamente diferentes a las descargadas por los animales.

Esta relación se utiliza con el fin de detectar el origen de la contaminación humana/animal en estudios de recursos hídricos²⁴. Numerosas investigaciones han mostrado que los animales presentan un alto número de enterococos que de coliformes fecales en su tracto gastrointestinal. Lo contrario sucede en el hombre.

Para que los resultados sean estadísticamente válidos, las siguientes condiciones deberán cumplirse:

1. La densidad de estreptococos fecales o enterococos deberá ser mayor a 25 UFC/100 ml.
2. El rango de pH de la fuente de agua deberá estar entre 4.0 y 9.0. La supervivencia bacteriana es afectada por muy altos o muy bajos pH.
3. Los coliformes fecales es el único conteo coliforme que proporciona un radio válido. Los coliformes totales incluyen muchísimas bacterias no fecales.
4. Las muestras colectadas no deberán estar más de 24 horas aguas debajo de la fuente de contaminación. Después de 24 horas, problemas con la muerte una a una de bacterias oscurece significativamente los radios.
5. Las muestras deberán ser colectadas de la misma fuente en el mismo tiempo.

6.2. Metodología

Para efectos de calcular el radio CF/E se realizó lo siguiente:

- Se eliminaron los registros cuyos conteos de enterococos estuvieran por debajo de 25 UFC/100 ml.

²³ Indicadores bacterianos como herramientas para medir la calidad ambiental del agua costera. Herrera A, Suárez P. INCI. 2005; 30(3):171- 176.

²⁴ The fecal coliform/fecal streptococci ratio (FC/FS) and water quality in the Bluegrass Region of Kentucky. Soil and Science News and Views. Coyne MS, Howell JM 1994; 15(9):1-8.



- Se validó que el pH no estuviera por fuera del rango 4.0 a 9.0.
- Se verificó que el tiempo de análisis de las muestras no superara las 24 horas desde el momento de la recolección de las mismas.
- Se validó que las muestras colectadas corresponden a la misma fuente, es decir no existen submuestras para los parámetros de CF y E.

Teniendo en cuenta lo anterior, se clasifica el origen de la contaminación fecal calculada según la **Tabla 8**:

Tabla 8. Clasificación del origen fecal de la contaminación según radio CF/E.
Fuente: The fecal coliform/fecal streptococci ratio (FC/FS) and water quality in the Bluegrass Region of Kentucky *Soil and Science News and Views. Coyne MS, Howell JM 1994; 15(9):1-8.*

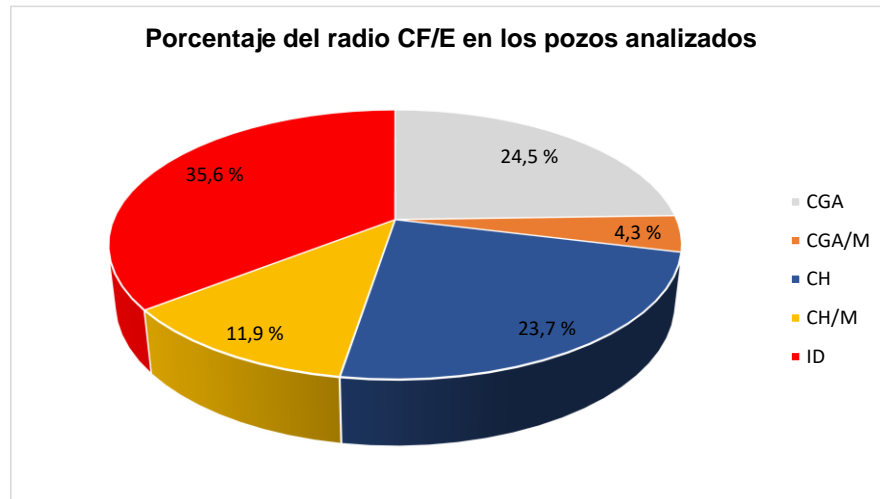
Valor cociente	Interpretación	Sigla
≥ 4	Contaminación deriva de desechos humanos.	CH
$\leq 0,7$	Contaminación deriva de ganado o aves de corral	CGA
2-4	Predominio de desechos humanos en contaminación mixta.	CH/M
0,7-1,0	Predominio de desechos de ganado o aves de corral en contaminación mixta.	CGA/M
1,0- 2,0	Interpretación dudosa	ID



6.3. Cálculo del radio CF/E

El análisis global del cociente CF/E (**Grafica 19**) muestra que el mayor porcentaje de pozos analizados (35,6%) presenta una interpretación dudosa - ID, es decir que no se puede determinar claramente el origen de la contaminación fecal encontrada en estas fuentes de agua. En orden descendente, se observan porcentajes relativamente menores (24,5%) procedentes de contaminación fecal de ganado o aves de corral - CGA.

Seguidamente, los resultados arrojan un porcentaje más bajo de pozos (23,7%) con contaminación humana - CH, es decir que la influencia de heces fecales proviene exclusivamente del hombre. Por último, se muestra en menor proporción (11,9%) que la contaminación presenta predominio de desechos humanos en contaminación mixta - CH/M y 4,3% de la contaminación tiene predominio de heces de ganado y corral en contaminación mixta - CGA/M.



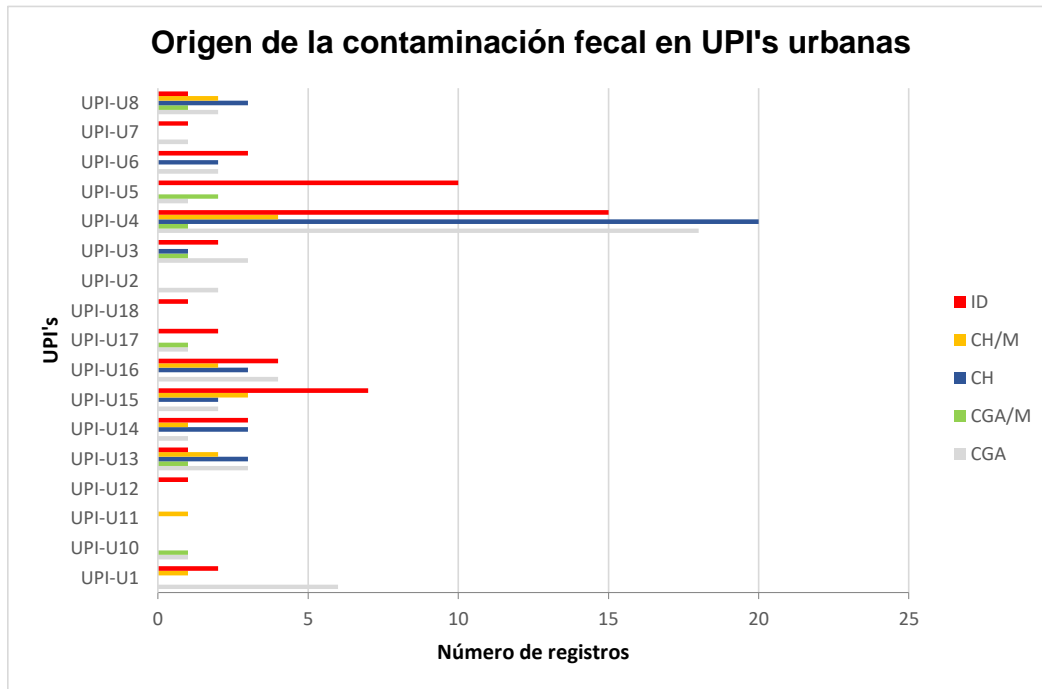
Grafica 19. Porcentaje del radio CF/E en los pozos analizados.
Fuente: Propia.



Con el ánimo de puntualizar el origen de la contaminación fecal encontrada en los diferentes pozos, se realizó el análisis teniendo en consideración el tipo de UPI de manera que se pueda determinar con mayor detalle los factores que influyen este tipo de contaminación.

Por lo anterior, se observa que la U4 se presenta en mayor número en todas las categorías de contaminación fecal del radio CF/E, siendo la contaminación fecal humana la de más alto valor. Este resultado es de esperarse teniendo en cuenta que la UPI en cuestión arrojó el mayor porcentaje en la escala de valoración con un resultado CB y un mayor número de registros de IRCA con riesgo inviable sanitariamente. Este hallazgo ratifica que la zona presenta una fuerte vulnerabilidad frente a los diferentes factores y/o tensores contaminantes que llegan fácilmente a los cuerpos de agua subterráneos disminuyendo su calidad y convirtiéndolos en focos de enfermedades de transmisión hídrica, lo cual se traduce en sintomatologías relacionadas principalmente con gastroenteritis agudas por virus y bacterias. En menor escala se observa todas las categorías de contaminación fecal en las UPI's U8 y U13, lo que indica la aparición de sintomatologías similares a las mencionadas anteriormente (**Grafica 20**).

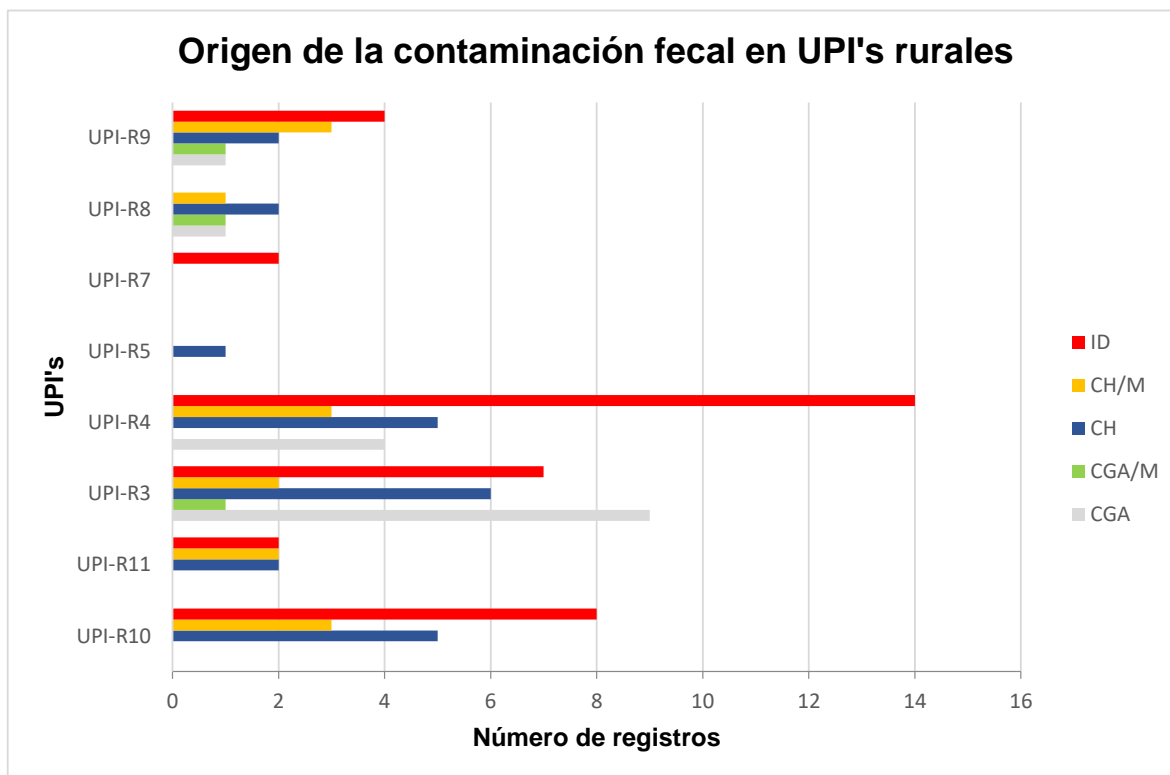
En menor número se observan registros de contaminación fecal de ganado o aves de corral – CGA, así como predominio de desechos humanos en contaminación mixta - CH/M y de heces de ganado y corral en contaminación mixta - CGA/M en las demás UPI's.



Grafica 20. Origen de la contaminación fecal en UPI's urbanas.
Fuente: Propia.

Haciendo el análisis de las UPI's rurales, los resultados muestran que la R4 presenta todas las categorías de contaminación fecal del radio CF/E, seguida en menor escala de la R10 y R3. Estos hallazgos coinciden con los registros más altos encontrados de IRCA para la categoría inviable sanitariamente y las mayores frecuencias en la escala de valoración con CB (**Grafica 21**).

Es de anotar que la R10 presenta la mayor frecuencia de pozos con contaminación fecal proveniente de ganado o aves de corral, resultado relacionado con las actividades ganaderas desarrolladas en esta zona que traen consigo microorganismos habitantes del intestino de otros animales de sangre caliente.



Grafica 21. Origen de la contaminación fecal en UPI's rurales.
Fuente: Propia.

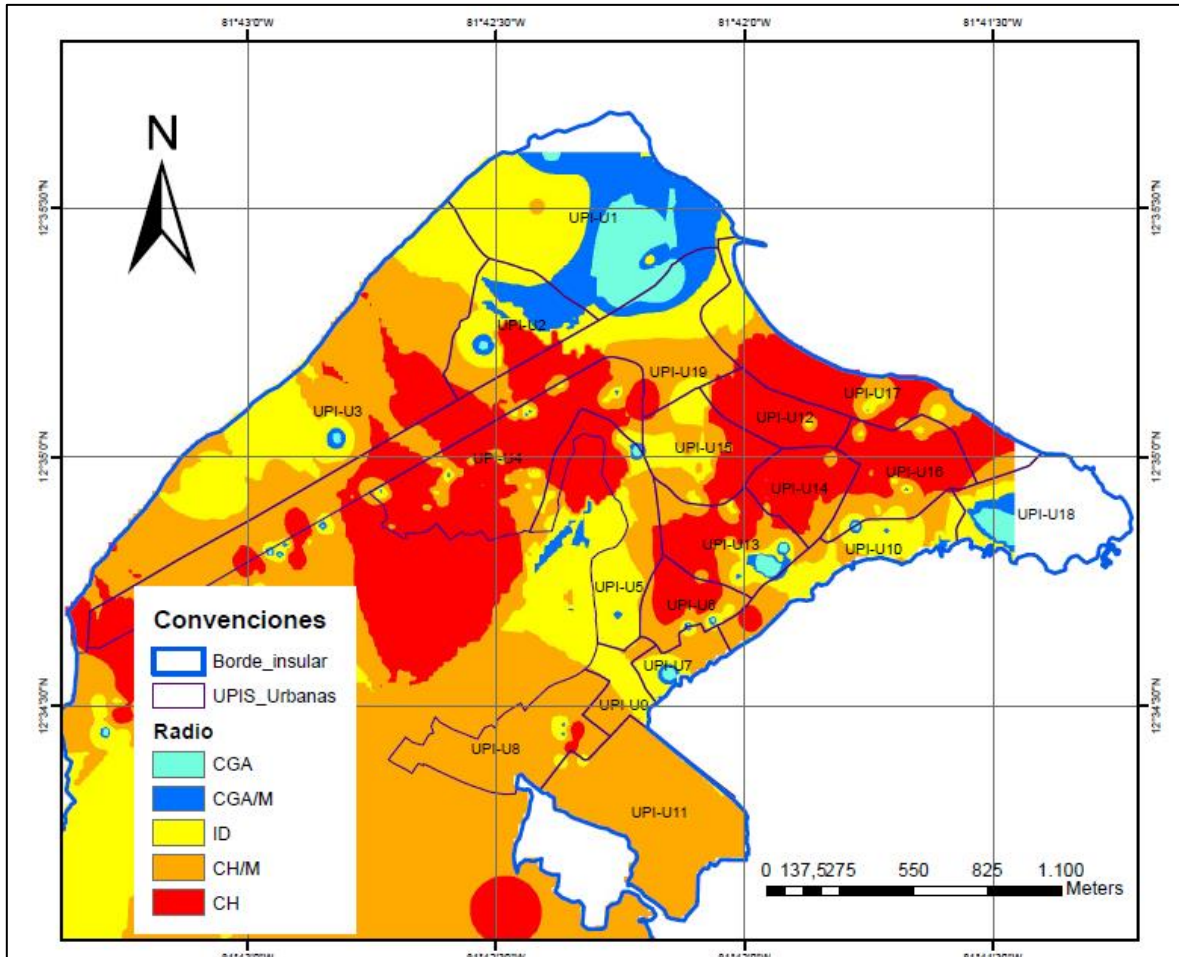
6.4. Análisis geoestadístico del radio CF/E

A nivel espacial se observa que las UPI's urbanas (**Figura 9**), presentan de forma mayoritaria, contaminación fecal de origen humano, de interpretación dudosa y de predominio de desechos humanos en contaminación mixta mostrando tendencialmente zonas agregadas, lo cual se traduce en una marcada contaminación de origen fecal humano. Se observan áreas dispersas que tienen influencia de contaminación fecal de ganado o aves de corral y predominio de desechos de ganado o aves de corral en contaminación mixta en la UPI U1.

En la **Figura 10**, se observa que las UPI's R6, R8 y R12 presentan vulnerabilidad a la contaminación fecal humana, así como las UPI's R10 y R11, mientras que las demás unidades tienen predominio de desechos humanos en contaminación mixta con algunas zonas de interpretación dudosa.

En el detalle general se observa (**Figura 11**) que las UPI's urbanas presentan en su mayoría contaminación fecal de origen humano debido a la alta densidad poblacional encontrada, excepto la U1 que arroja contaminación fecal de ganado o aves de corral. En la parte rural se presenta contaminación fecal humana, desechos humanos en

contaminación mixta y zonas puntuales pequeñas con influencia de desechos de ganado o aves de corral en contaminación mixta.



20 años Sede Caribe



Figura 13. Análisis geoestadístico IDW para el radio CF/E en las UPI's urbanas
Fuente: Propia.

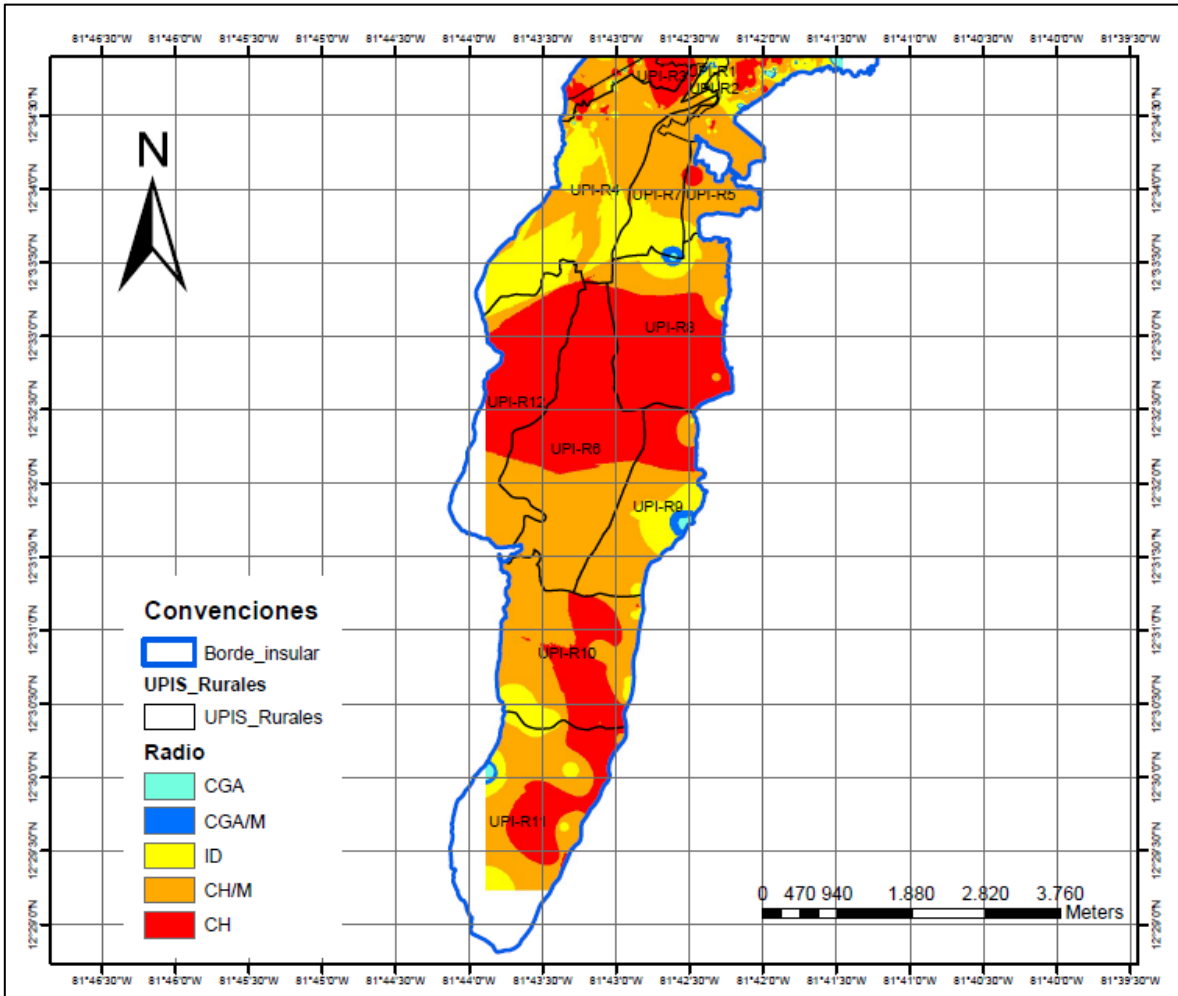


Figura 14. Análisis geoestadístico IDW para el radio CF/E en las UPI's rurales
Fuente: Propia.

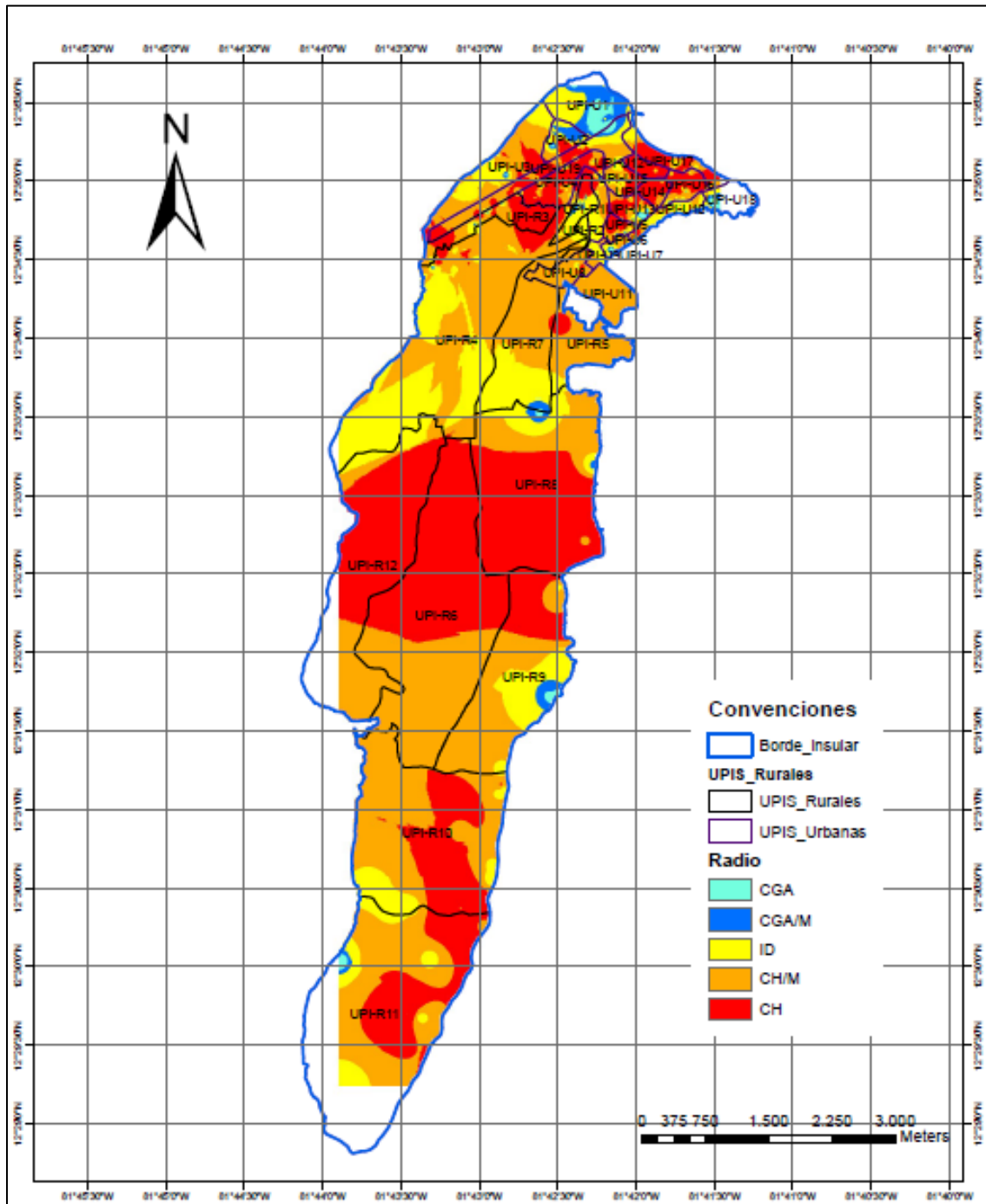


Figura 15. Análisis geoestadístico IDW para el radio CF/E en las UPI's
Fuente: Propia.



7. CONCLUSIONES

El comportamiento del promedio de los valores de conductividad eléctrica en los pozos analizados sugiere que se trata de aguas moderadamente salobres según la clasificación W. Breack 1991, lo cual indica que la contaminación típica de las aguas subterráneas es debida a la mezcla existente entre el agua de mar y el agua dulce residente en la isla. Esta mezcla es producida por los diferentes bombeos que tienen como efecto que las aguas saladas se instruyan aguas adentro.

Las concentraciones de nitratos encontradas en casi todas las UPI's están por debajo del límite máximo permisible (10 mg/l) para agua potable. Así las cosas, estos pozos no representan un riesgo para la salud de la población que consume agua de estas captaciones. Sin embargo, el 10 % de los pozos analizados presenta niveles de nitratos que pueden acarrear problemas a la salud por el consumo del agua, de allí que deberán ser continuamente monitoreados por parte de las entidades responsables del recurso.

Las densidades bacterianas de coliformes fecales y enterococos representados en los promedios del logaritmo ($_{10}$) evidencian altos conteos en casi todas las UPI's analizadas, estos microorganismos autóctonos del intestino de humanos y otros animales de sangre caliente, representan peligro sanitario cuando llegan a cuerpos de agua por la posibilidad de sintomatologías que afectan el tracto gastrointestinal.

El 93,1% de pozos analizados presentan CB en la escala de valoración propuesta mientras que sólo el 3,9% de los pozos presenta CA y 3% CM; resultados que evidencian el alto grado de deterioro que existe en los acuíferos de la isla por la influencia de contaminantes químicos y sanitarios que afectan la calidad del recurso hídrico subterráneo.

La aplicación de la escala de valoración de la calidad e IRCA modificado permiten en cierta medida describir la calidad del agua extraída de los pozos, sin embargo, es preciso que estas metodologías abarquen todas las variables indicadoras del estado del recurso hídrico subterráneo a fin de obtener mayor robustez en los resultados.

La mayoría de pozos de la U4 presentan un resultado CB en la escala de valoración, sumado a un riesgo inviable sanitariamente en el IRCA, que en su conjunto apuntan que se trata de una zona que debe ser objeto de seguimiento y control de la calidad de las aguas subterráneas, más aún por la influencia alta y constante de factores contaminantes principalmente de tipo microbiológico fecal humano convirtiéndola en un foco de aparición de síntomas gastrointestinales.

La mayoría de pozos de la R4 presenta un resultado CB en la escala de valoración, sumado a un riesgo inviable sanitariamente en el IRCA que evidencian un área afectada por factores contaminantes principalmente de tipo microbiológico fecal





mixto (contaminación fecal humana y animal) susceptible de riesgo por patologías de tipo gastrointestinal.

Las metodologías de la escala de valoración e IRCA modificado pese a que poseen diferentes grados de valoración de la calidad y variabilidad en los parámetros, concuerdan en el hallazgo del alto grado de contaminación que existen principalmente en la UPI's U4, U15, R4, R3 y R10, lo cual podría indicar que la influencia de tenses contaminantes encontrados en estos lugares es de larga duración y alta magnitud.

El radio CF/E denota el origen fecal de la contaminación, pese a zonas de incertidumbre o de interpretación dudosa, el análisis espacial en las UPI's urbanas muestra que la contaminación fecal es de origen humano o con predominio de desechos humanos en contaminación mixta, posiblemente por la alta densidad poblacional en estos sitios, aunado a un deficiente sistema de saneamiento básico que ocasionan problemas sanitarios y la alta posibilidad de aparición de síntomas gastrointestinales hasta derivar en enfermedades de transmisión hídrica propiamente dichas.

Según el radio CF/E, las UPI's rurales ubicadas en la zona central tales como R6, R8 y R12 presentan vulnerabilidad a la contaminación fecal humana, así como la R10 y R11. Las demás UPI's tienen predominio de desechos humanos en contaminación mixta con pocas zonas de interpretación dudosa.





8. BIBLIOGRAFIA

1. Bosque Sendra, J. Sistemas de Información Geográfica, Ediciones Rialp, Madrid. 2000.
2. Caracterización de la demanda, presiones por uso y tensores contaminantes de la explotación doméstica de agua subterránea en San Andrés por Unidad de Planificación Insular. GISLand- Holistic Consulting. 2018.
3. Caracterización de la población del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Fase 1 y Fase 2. DANE. 2014.
4. Coyne MS, Howell JM. The fecal coliform/fecal streptococci ratio (FC/FS) and water quality in the Bluegrass Region of Kentucky. Soil and Science News and Views. 15(9):1-8.1994.
5. Diagnóstico actualizado de la oferta y demanda de agua en la isla de San Andrés para toma de decisiones a nivel de administración del Recurso Hídrico (2016-2017). CORALINA. 2017.
6. Environmental sampling and analysis for technicians. M. Csuros. 1994.
7. Geología y Aspectos Geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. Geología Colombiana. No.29, 71 - 87. Vargas, G. 2004.
8. Indicadores bacterianos como herramientas para medir la calidad ambiental del agua costera. Herrera A, Suárez P. INCI; 30(3):171- 176. 2005.
9. Modelación del acuífero San Andrés Isla. Proyecto INAP – Colombia. Coralina & UNAL. 2010.
10. O’Sullivan, D. and D. J. Unwin. Geographic Information Analysis, Wiley, Nueva Jersey. 2003.
11. Pérez y Pacheco. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Ingeniería 8-1:33-42. 2004.
12. Pérez Vega, A. y J.-F. Mas. “Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación”, Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 69, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 53-67. 2009.





13. Plan Director del Recurso Hídrico de San Andrés. Producto 3. Estudios complementarios. Gobernación de San Andrés- Findeter. CDM Smith. 2016.
14. Propuesta de escala de valoración de la calidad sanitaria del agua subterránea en la isla de San Andrés. CORALINA. 2010.
15. SIG de zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la isla de San Andrés. Liane G. 2013.
16. Síntesis marco normativo nacional de los ERA. Fuente: Marco conceptual metodológico para las Evaluaciones Regionales del Agua. IDEAM: 2011.
17. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad: Identificación de zonas críticas. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). Chile. 2006.
18. Watson, D.F. and Philip, G.M. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. Geoprocessing, 2, 315-327. 1985.

