

**EVALUACIÓN DE LA AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO FÍSICO PARA
LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS DE LA ISLA DE SAN ANDRÉS, COLOMBIA,
USANDO TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

POR:

Liane Gamboa Corrales

Geóloga

Especialista en Sistemas de Información Geográfica



UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FALTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA

MAESTRIA EN TECNOLOGIAS DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN

Manizales, Caldas

Septiembre de 2017

**EVALUACIÓN DE LA AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO FÍSICO PARA
LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS DE LA ISLA DE SAN ANDRÉS, COLOMBIA,
USANDO TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

POR:

Liane Gamboa Corrales

Geóloga

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

**Trabajo de grado para optar por el título de Máster en Tecnologías de los Sistemas de
Información.**

Asesor

JOHN MAKARIO LONDOÑO

PhD, Servicio Geológico Colombiano.

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FALTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA

MAESTRIA EN TECNOLOGIAS DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN

Manizales, Caldas

Septiembre de 2016

NOTA DE ACEPTACION

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Manizales, Caldas

Septiembre de 2016

**Agradecimientos a mi familia y a la vida
por ponerme en el lugar indicado y en el
momento ideal.**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	11
1. JUSTIFICACION	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION	17
3. ANTECEDENTES	20
4. OBJETIVO GENERAL	24
4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4.2. HIPÓTESIS.....	25
5. MARCO TEÓRICO.....	26
5.1. MARCO REFERENCIAL	26
5.2 MARCO CONCEPTUAL.....	36
5.2.1 DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA.....	36
5.2.2 DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD.....	46
5.2.3 DETERMINACIÓN DEL RIESGO	57
5.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	59
5.3.1 Perforación de pozos	59
5.3.2 Pozos de observación.....	60
5.3.3 Inventario de pozos	60
5.3.4 Métodos geofísicos	61
5.3.5 Estudios hidrogeológicos.....	62
5.3.6 Mapas geológicos.....	63

5.4	APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) A LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN	64
5.4.1	Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de amenaza de acuíferos.....	64
5.4.2	Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos	65
5.4.3	Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de riesgo de acuíferos.....	67
6	RESULTADOS.....	68
6.1.	DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA.....	68
6.1.1	Procesamiento de bases de datos de fuentes contaminantes, homogenización de la información y sistema de coordenadas. Puntos y polígonos.	68
6.2.	DETERMINACION DE LA VULNERABILIDAD: PARAMETROS GOD.....	76
6.2.1	Groundwater Occurrence (G)	76
6.2.2	Overall Lithology (O)	76
6.2.3	Depth To Groundwater (D)	77
6.3	MAPA DE VULNERABILIDAD.....	112
6.4	DETERMINACION DEL RIESGO	116
7.	ANALISIS DE RESULTADOS	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Creación de recursos y fuentes de mapas de vulnerabilidad por la combinación de los factores O, C y K	49
Figura 2 Sistema de indexación GOD, para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.	56
Figura 3 Mapa de inventario de amenazas. Elaboración propia.	70
Figura 4 Mapa Índice de Peligrosidad HI. Elaboración propia.	75
Figura 5 Mapa de polígonos Groundwather. Elaboración propia.....	77
Figura 6 Mapa Raster Groundwather. Elaboración propia.	78
Figura 7 Mapa de polígonos de Overall Lithology. Elaboración propia.	79
Figura 8 Mapa Raster Overall Lithology. Elaboración propia.	81
Figura 9 Mapa de localización piezómetros red del Sector Norte. Elaboración propia.	84
Figura 10 Mapa de localización piezómetros de la Red del Valle del Cove. Elaboración propia.....	85
Figura 11 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 1996. Elaboración propia.....	91
Figura 12 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 2010. Elaboración propia.....	91
Figura 13 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 1999. Elaboración propia.....	91
Figura 14 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 2010. Elaboración propia.....	92
Figura 15 Mapa Método Kriging Simple Figura 16 Mapa Método IDW	98
Figura 17 Validación cruzada entre Kriging simple e IDW	99
Figura 18 Curva QQplot del método Kriging Simple	100
Figura 19 Validación cruzada entre Kriging Simple y Ordinario.....	101
Figura 20 a) Mapa Método Kriging simple b) Mapa Método Kriging Ordinario.	101
Figura 21 Histograma Kriging Ordinario.....	102
Figura 22 Curva Normal QQplot Kriging Ordinario	103
Figura 23 Análisis de tendencias Kriging Ordinario	104
Figura 24 Semivariograma y Nube de covarianza.....	104
Figura 25 Trend removal.....	106
Figura 26 Semivariogram7Covariance Modeling.....	106
Figura 27 Cross Validation Kriging Ordinario con y sin trend	107
Figura 28 Mapa Kriging Ordinario sin procesamiento.	107
Figura 29 Mapa Kriging Ordinario con procesamiento.....	107

Figura 30 Mapa de piezometría 1997	108
Figura 31 Mapa de piezometría 1998	108
Figura 32 Mapa de piezometría 2002	108
Figura 33 Mapa de piezometría 2003	108
Figura 34 Mapa de piezometría 2009	109
Figura 35 Mapa de piezometría 2010.....	109
Figura 36 Reclasificación según parámetros GOD	110
Figura 37 Mapa de piezometría reclasificado 1997.....	110
Figura 38 Mapa de piezometría reclasificado 1998.....	110
Figura 39 Mapa de piezometría reclasificado 2002.....	111
Figura 40 Mapa de piezometría reclasificado 2003.....	111
Figura 41 Mapa de piezometría reclasificado 2009.....	111
Figura 42 Mapa de piezometría reclasificado 2010.....	111
Figura 43 Ponderación numérica GOD	112
Figura 44 Ponderación cualitativa GOD.....	112
Figura 45 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1997.....	113
Figura 46 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1998.....	113
Figura 47 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2002.....	113
Figura 48 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2003.....	113
Figura 49 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2009.....	114
Figura 50 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2010.....	114
Figura 51 Mapa de Riesgo por contaminación. Elaboración propia.....	118
Figura 52 Geodatabase AMENAZA_VULNERABILIDAD_RIESGO.....	136
Figura 53 Datos cargados en la Geodatabase.....	136
Figura 54 Visualización de la Geodatabase en ArcMap.....	137

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de amenazas, Nivel I.....	37
Tabla 2 Clasificación, Nivel II.....	39
Tabla 3 Clasificación, Nivel II.....	40
Tabla 4 Tipos de amenazas dentro del sitio de prueba de Nassfeld, identificadas y evaluadas según el inventario de peligros instalados por WG3 (Tomado de COST Action 620).	45
Tabla 5 Límites del índice de intensidad del riesgo y clases de riesgo propuestos.	59
Tabla 6 Fuentes de contaminación	71
Tabla 7 Parámetros hidráulicos obtenidos en pruebas de bombeo.....	72
Tabla 8 Evaluación de la amenaza	74
Tabla 9 Tabla de atributos del Shp Groundwather.....	78
Tabla 10 Tabla de atributos Shp Overall Lithology	80
Tabla 11 Pozos de observación que conforman la red de piezometría.....	86
Tabla 12 Episodios históricos del El Niño.....	94
Tabla 13 Periodos piezométricos a utilizar	96

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO 1. Geodatabase y Mpk del proyecto

ANEXO2. Diccionario de datos

RESUMEN

El presente trabajo de grado se basó en la aplicación de herramientas SIG en la evaluación de diferentes metodologías de cálculo para la determinación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo por contaminación en acuíferos kársticos, con el fin de definir la mejor alternativa aplicable a los acuíferos en la isla de San Andrés, partiendo inicialmente de la implementación de la metodología GOD (Groundwater Overall Depth) para la construcción de la cartografía de vulnerabilidad en acuíferos con poca información y recalculado con la información de 14 años de monitoreo de piezometría y la aplicación de metodologías probadas específicamente para acuíferos kársticos por la Acción Europea COST 620 para la evaluación de la vulnerabilidad, la amenaza y el riesgo.

Los anteriores métodos fueron procesados y validados con la ayuda de un software cartográfico (ArcGis), con el fin de hacer el mejor manejo de información temática y validación de salidas graficas por medio de la valoración estadística y geoestadística disponible en este tipo de herramientas, de temas tales como formaciones geológicas, hidrogeológicas y superficies freáticas de los acuíferos en la isla, la reclasificación de acuerdo a controles de campo y criterios hidrogeológicos y su posterior organización en un modelo de datos.

Varios procedimientos fueron utilizados para el cálculo de parámetros incluidos en las metodologías de vulnerabilidad y amenaza; específicamente para el cálculo de vulnerabilidad y la generación del parámetro D del método, se seleccionaron de la base de datos de piezometría de CORALINA los periodos lluviosos y de sequía para cada año, con base en la precipitación promedio anual del período de estudio correspondiente a los episodios históricos de El Niño máximos, quedando seleccionados los periodos de 1997 y 1998, 2002 y 2003 y 2009 y 2010.

Dicha información fue valorada por medio de estadística básica y posteriormente interpolada por los métodos IDW, Kriging Simple y Kriging Ordinario, siendo este último el que en términos estadísticos y visuales se acercó mejor a la representación en la realidad de la superficie freática de la isla. Posteriormente se procedió a utilizar herramientas geoestadísticas que permitieron evaluar la interpolación de modo que se pudiera eliminar la mayor cantidad de trends en los datos para generar una representación real de los niveles freáticos.

Con el análisis de las variables planteadas en las metodologías, se procedió a realizar algebra de mapas y generar la representación cartográfica del riesgo a la contaminación de los acuíferos, encontrando que los las áreas de vulnerabilidad extrema disminuyen considerablemente desde 1997 hasta 2010, lo cual es debido a la variación en profundidad de los niveles freáticos y a su profundización a lo largo de los años, lo cual hace que sean de menos accesibilidad a los contaminantes. Por otra parte, Se pudieron determinar zonas de muy alto riesgo concentradas principalmente en la parte central de la isla (En sentido Sur - Norte, desde Lions Hill incluyendo la Cuenca del Cove y la ensenada del Cove hasta Court House y en sentido Este - Oeste desde el Barack hasta Linval), en donde si bien los niveles freáticos tienen mayor profundidad, se

determinó la presencia de agentes amenazantes con alto potencial de contaminación, que le imprimen un alto riesgo a esta área, relacionados principalmente con la presencia de zonas de disposición de residuos, presencia de cementerios y red de pozos profundos sin un perímetro de protección definido.

PALABRAS CLAVE

Isla de San Andrés, Acuífero, Nivel freático, Vulnerabilidad, Métodos de interpolación, Geoestadística, peligrosidad, SIG, ArcGis, riesgo, Kriging Ordinario, Hidrogeología, Algebra de Mapas, Geodatabase.

ABSTRACT

The present work of degree was based on the implementation of GIS software and his tools for the evaluation of different calculation methodologies for the determination of hazards, vulnerability and risk by contamination in karstic aquifers, in order to define the best alternative applicable to aquifers in the island of San Andres, starting from the implementation of the GOD (Groundwater Overall Depth) methodology for the construction of aquifer vulnerability mapping with little information and recalculated with information from 14 years of piezometric monitoring. This methodology allowed multi temporal comparisons and calibration of the same. In addition, in order to determine the applicability of methodologies specifically tested for karstic aquifers by the European Action COST 620 for the assessment of vulnerability, the proposals were reviewed; their scope and applicability were determined with the information available on the island of San Andrés. Finally, one of the methods of calculation of risks stipulated by the European Action COST 620 was implemented.

The previous methods were processed through the use of GIS tools, in order to make the cartographic management of thematic information, such as geological formations, hydrogeological and groundwater tables of the aquifers in the island, reclassification according to field controls and hydrogeological criteria and their subsequent organization in a data model.

Several procedures were used for the calculation of parameters included in vulnerability and threat methodologies; specifically for the calculation of vulnerability and the generation of D parameter of the method, the rainy and drought periods for each year were selected from the CORALINA piezometry database, based on the annual average precipitation of the study period corresponding to the historical episodes of El Niño maximum, being selected the periods of 1997 and 1998, 2002 and 2003 and 2009 and 2010.

This information was valued by means of basic statistics and later interpolated by the IDW, Simple Kriging and Ordinary Kriging methods, being the latter the one that in statistical and visual terms came closer to the representation in reality of the island's groundwater table. Subsequently, geo statistics tools were used which allowed to evaluating the interpolation so that the most trends could be eliminated in the data to generate a real representation of the groundwater tables.

With the analysis of the variables proposed in the methodologies, maps algebra and mapping of the risk to the aquifer contamination were analyzed, finding that the areas of extreme vulnerability decreased considerably from 1997 to 2010, which is due to the depth variation of the ground tables and their deepening over the years, which make them less accessible to contaminants. On the other hand, areas of very high risk could be determined mainly concentrated in the central part of the island (South - North direction, from Lions Hill including Cove Basin and Cove Cove to Court House and East - West From the Bar to Linval), where although the groundwater tables have a greater depth, it was determined the presence of

threatening agents with high pollution potential, which gives a high risk to this area, related mainly to the presence of disposal areas of waste, the presence of cemeteries and a network of deep wells without a defined perimeter of protection.

KEY WORDS

San Andrés Island, Aquifer, Groundwater tables, Vulnerability, Interpolation Methods, Geostatistics, Danger, GIS, ArcGis, Risk, Ordinary Kriging, Hydrogeology, Map Algebra, Geodatabase.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio obedece a la necesidad y la importancia de actualizar y generar nueva información acerca del estado del recurso hídrico subterráneo en la Isla de San Andrés en cuanto a su riesgo de contaminación, su evolución temporal y su influencia con los fenómenos de variabilidad climática que afectan la región y que condicionan en gran medida el comportamiento de los acuíferos y sus condiciones de calidad.

El recurso hídrico subterráneo en la isla de San Andrés, el cual es la principal fuente hídrica en las islas, evidencia altos niveles de contaminación, producto de las diversas actividades contaminantes relacionadas con la mala disposición de residuos líquidos y sólidos en superficie. Debido a la conformación geológica de las rocas y de su comportamiento hidrogeológico, permiten en mayor o menor medida el ingreso de dichos contaminantes a la superficie freática.

Es por ello que la implementación de herramientas y técnicas ofrecidas por los Sistemas de Información Geográfica, permitieron para este caso la gestión de la información geográfica en el marco de la metodología GOD (Foster et Al, 1987 en MENA, G. & MONTES, J.,2010) para el cálculo de la vulnerabilidad y los métodos propuestos en la Acción COST 620 (Hötzl et al., 2004 en Jiménez, A. et al., 2010) para la determinación de la vulnerabilidad, amenaza y el riesgo de

contaminación y por medio de aplicaciones integradas como ArcGis ®, sus herramientas de geoestadística y ArcCatalog, fue posible hacer la gestión de la información geográfica disponible de parámetros intrínsecos tales como litología, profundidad de la tabla de agua y tipo de acuíferos, para confluír en la determinación del riesgo a la contaminación, e inventario de fuentes contaminantes difusas o puntuales, evidenciándose con la información histórica, los años de mayor vulnerabilidad, amenaza y riesgo, la tendencia histórica y las zonas más críticas en el territorio; información que permite de una manera directa hacer gestión y control del territorio, enmarcado en políticas restrictivas en la disposición de residuos contaminantes y planteamiento de alternativas limpias de manejo, con miras a la protección de la calidad de los acuíferos.

1. JUSTIFICACION

Las aguas subterráneas de la isla de San Andrés se encuentran en un 80% contaminadas por agentes contaminantes, producto de disposición en superficie de aguas negras y grises, actividades de agricultura y porcicultura (PMAS, 2000) que han llegado hasta el recurso hídrico subterráneo, debido a la facilidad que tiene estos contaminantes en ser transportados por la escorrentía superficial e ingresar por zonas preferenciales a los acuíferos.

Estos agentes contaminantes obedecen en gran medida al déficit de cobertura del servicio de alcantarillado, ya que las áreas con menor cobertura corresponden específicamente a los asentamientos rurales localizados en las zonas altas (cuena central) y zona sur oriental (cuena sur), los cuales según L. Arboleda 2010, se encuentran en un 99% sin cobertura del servicio; sin embargo es importante aclarar que la mayor cantidad de asentamientos humanos en la isla se localizan en la zona norte, zona que cuenta con una cobertura del 43,6% (Tomado de Plan De Saneamiento y Manejo de Vertimientos para la Isla de San Andrés. PROACTIVA Aguas del Archipiélago S.A E.S.P. Departamento Archipiélago de San Andrés Providencia y Santa Catalina. Diciembre 2012)

Pese a lo anterior, la principal zona de recarga del acuífero San Andrés, localizada en inmediaciones de la Cuenca del Cove, se encuentra dentro de la zona sin cobertura de alcantarillado y es allí donde precisamente se desarrollan actividades culturales como porcicultura y agricultura, y pese a que la población de esta zona es netamente rural y de carácter raizal, las prácticas de disposición de aguas negras y grises se ha realizado a lo largo de los años por medio de pozos sépticos construidos sobre la roca sin ningún tipo de impermeabilización.

En cuanto a lo anterior CORALINA por medio del Plan de Manejo de la Cuenca del Cove, y basándose en los resultados de estudios de geología e hidrogeología, determinó que esta zona debía ser objeto de protección y regulación de actividades, por corresponder a la principal zona de recarga del acuífero San Andrés.

Los monitoreos de calidad del agua subterránea realizados por CORALINA, han evidenciado la presencia de contaminantes en el recurso hídrico subterráneo, pese a las declaratorias de protección, hecho comprobado por medio de los análisis de resultados obtenidos en la red de calidad. En este mismo estudio se menciona que los principales componentes contaminantes corresponden a los vertimientos de aguas grises y negras, provenientes de las actividades humanas que no cuentan con un servicio de alcantarillado, tales como vertimiento de aguas jabonosas, utilización de pozos sépticos, etc.

Por lo anterior, la determinación del riesgo a la contaminación de los acuíferos de la isla de San Andrés es fundamental para dar a conocer con criterios técnicos, las áreas que por sus características intrínsecas, dinámicas del agua subterránea, del suelo de protección y de los

regímenes de precipitación, presentan mayor o menor susceptibilidad de sufrir algún daño ante amenazas contaminantes antrópicas, y de esta manera generar esquemas de mayor precisión para la restricción de actividades potencialmente contaminantes y propiciar el desarrollo de cobertura de alcantarillado en las áreas requeridas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

Los acuíferos kársticos son un recurso estratégico en muchas regiones del mundo debido a los altos caudales de agua que producen y están asociados sobre todo a formaciones carbonatadas afectadas por fisuración y disolución (karstificación). En algunos países europeos el peso de las aguas kársticas en el total del agua suministrada para los diferentes usos es importante: Austria, Eslovenia (50 %); Bélgica, Croacia, Eslovaquia, Francia (25 a 35 %); Reino Unido, Suiza (15 a 20 %); Estado Español (12 %), según datos recogidos en el informe COST 65 (1995) en Montes, et Al., 2007.

La isla de San Andrés en Colombia, presenta en su conformación un sistema geológico kárstico formado por rocas calizas denominadas Formación San Andrés y Formación San Luis, las cuales corresponden a acuíferos libres conectados hidráulicamente y que se encuentran en forma de bolsones, flotando sobre agua de mayor salinidad o interface agua dulce agua salada. Su recarga se da por la infiltración de agua lluvia que ingresa por las zonas cavernosas que conectan la superficie con los niveles freáticos del agua subterránea.

Esta condición geológica particular y la conformación geográfica de insularidad se presenta en el Caribe en islas como Puerto Rico en donde el 27.5% del territorio¹, en su gran mayoría está compuesto por rocas carbonatadas calizas, las cuales tienen la particularidad que se disuelven cuando entran en contacto con un ácido débil; este proceso es el resultado de la meteorización de la roca carbonatada, cuando el agua de la lluvia, que al caer adquiere bióxido de carbono en el aire, convirtiéndose en ligeramente ácida, va disolviendo la roca a través del tiempo geológico.

A nivel nacional, San Andrés isla, es el único territorio con las particularidades mencionadas y con el desarrollo urbano actual, lo cual le imprime al recurso hídrico subterráneo una gran presión y demanda. Los problemas evidenciados en las islas son similares a los presentados en las zonas costeras de Colombia, en donde gran parte de la población se asienta en la zona costera ejerciendo presión sobre los recursos y haciendo uso en muchos lugares de pozos de agua subterránea, cuando la disponibilidad de agua en ríos es baja o cuando las tasas de precipitación lo son también.

Las islas oceánicas como San Andrés presentan grandes retos en cuanto al suministro de servicios públicos como el agua potable, ya que su localización las hace de difícil acceso y genera una dependencia exclusiva al recurso hídrico subterráneo y el aprovechamiento del potencial del agua lluvia tanto para consumo humano y doméstico, como para la recarga de los acuíferos, principal fuente de recarga para la isla.

¹ El Karso y su importancia en Puerto Rico. **Abel Vale Presidente Junta de Directores Ciudadanos del Karso.**
<http://www.corrienteverde.com/editoriales%20anteriores/karso.html>. Revista ambiental corriente verde
contactanos@corrienteverde.com. Dirección: Urb. Los Paisajes del Lago #126 . Luquillo, Puerto Rico, 00773

Sin embargo, debido a que el agua lluvia no es aprovechada en su totalidad, esta condición hace que el recurso hídrico subterráneo sea de gran demanda para la población creciente de los territorios insulares y costeros donde se asienta un gran porcentaje de la población. El agua subterránea es utilizada en más de un 80 % en la isla (PMAS 2000), por lo cual se puede considerar un recurso con alta presión en cuanto a la demanda y con gran afectación por contaminación debido a las características particulares geológicas que permiten la infiltración por medio del agua lluvia de cualquier tipo de contaminante que pueda ser arrastrado por ella.

En la actualidad no se cuenta con estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos para la isla, relacionados con fenómenos de contaminación hacia los acuíferos. Por lo tanto, es muy importante conocer cuáles son las amenazas contaminantes puntuales y dispersas y la zonificación de la vulnerabilidad de los acuíferos en la isla, con miras a plantear mejores medidas de protección y mitigación ante dicha contaminación de un recurso fundamental y casi exclusivo para el territorio insular.

Este trabajo pretende realizar un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por contaminación de los acuíferos en la isla de San Andrés, usando tecnologías de información geográfica para el análisis espacial de las variables que influyen en el sistema.

3. ANTECEDENTES

Se han realizado muchos estudios temáticos relacionados con la identificación y cartografía geológica y de los acuíferos en la isla de San Andrés desde el año 1956 (Hubach E.) y hasta 2010, en donde autores como Geister J., Guzmán G., y Hernández O. en INGEOMINAS, Huguett A., Cañas H., y Martínez C., Universidad Nacional sede Medellín – CORALINA, entre otros, realizaron aproximaciones a la cartografía geológica de la isla de San Andrés hasta la generación del modelo hidrogeológico conceptual y la modelación del acuífero, estudios que permiten tener una base cartográfica detallada de las condiciones hidrogeológicas insulares.

Sin embargo, en cuanto al tema de vulnerabilidad a la contaminación, las únicas aproximaciones temáticas corresponden a CORALINA - INGEOMINAS (1996), en el Estudio de las Amenazas Geológicas de la Isla de San Andrés, en donde se presentaron las condiciones fisiográficas, hidrometeorológicas, geológicas, sísmicas y usos del suelo de la isla, con el fin de identificar las potenciales amenazas de origen natural. Por otro lado INGEOMINAS (1998) realizó el Estudio de Contaminación de Acuíferos en la Isla de San Andrés, Perforación y Construcción de la Red de Piezómetros del Sur de la Isla de San Andrés, y la construcción de 12 piezómetros. Vargas M. Et al. (1997) –INGEOMINAS, realizaron la caracterización y modelación del régimen de las aguas subterráneas y la primera aproximación a la evaluación del riesgo de contaminación de las

aguas subterráneas en la isla de San Andrés. Sin embargo, estos análisis no se realizaron con una serie histórica adecuada de datos en cuanto a lo relacionado con niveles estáticos del agua subterránea. Gamboa, L. 2013, realizó el cálculo y cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, con información histórica de 12 años y aplicando la metodología GOD (Foster et Al, 1987 en MENA, G. \$ MONTES, J., 2010)

Estos trabajos previos sobre la naturaleza de los acuíferos fueron materia prima importante para la primera aproximación del conocimiento del agua subterránea en la isla, e insumo fundamental para la formulación del Plan de Manejo de aguas subterráneas (2000), el cual en combinación con aspectos sociales y económicos con los técnicos y legales, permitieron a CORALINA evaluar el problema hídrico de la Isla desde un punto de vista integral, permitiendo generar un mecanismo de manejo sostenible del recurso, regulando la extracción del agua subterránea, por medio de concesiones basadas en pruebas de bombeo.

Este plan de manejo se planteó para un periodo de acción de 10 años, durante los cuales se realizó monitoreo continuo de los recursos, permitiendo con ello tener un número considerable de información que puede ser utilizada para el refinamiento de la misma y específicamente de zonificación de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, a la luz de las condiciones actuales.

La información generada por la gran variedad de instrumentos ha permitido determinar la naturaleza kárstica de las rocas en la isla de San Andrés, la capacidad de almacenamiento de

agua en poros y grietas de las formaciones geológicas presentes en el territorio, conformando lo que se conoce como acuíferos libres, en los cuales la superficie freática se encuentra en contacto con la atmosfera; en algunos casos a pocos metros de la superficie y en otros a decenas de metros; sin embargo, la condición característica de las rocas suprayacentes y de los suelos, permite el ingreso casi directo, en algunos lugares, tanto del agua lluvia como de los contaminantes antrópicos que son arrastrados por la misma.

La complejidad de los sistemas kársticos ha contribuido a que la contaminación de los acuíferos de la isla se presente de una manera generalizada, ya que se desconoce en gran medida las zonas de almacenamiento y la dirección de los flujos locales, aunque se plantea en los modelos hidrogeológicos tendencias de flujo regionales de tipo radial.

La anterior situación implica, que existen zonas del acuífero más vulnerables que otras, por medio de las cuales, los contaminantes generados en superficie ingresan de manera directa a los acuíferos. Sin embargo, y no menos importante, está también la condición de desarrollo urbano sin los respectivos servicios de saneamiento básico (Alcantarillado).

EL 30.6% de la isla cuenta con servicios de acueducto y alcantarillado y se localiza principalmente en la zona norte de la isla, quedando descubierto un 69.4% de la zona rural sur y central de la isla, esta última en inmediaciones a la cuenca del Cove, definida como zona de protección tanto en el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas como en el Plan de Manejo de la Cuenca del Cove.

De la totalidad de la zona rural el 99% se encuentra sin alcantarillado; el estado no ha realizado ningún tipo de intervención y consecuentemente ha sido la población la responsable de la correcta disposición de sus excretas, recayendo en ésta el compromiso de toda una sociedad con la sostenibilidad ambiental y con las futuras generaciones, mientras el Estado permanece al margen de esta situación.⁴

Del censo poblacional del DANE del 2005, se puede considerar que entre el 72 y 75% de la población de la Isla se concentra en el perímetro urbano al norte de la Isla (Sector North End). En este sector se agrupan también la mayoría de los hoteles y el comercio de la Isla. La población asentada en la zona norte de la isla aunque cuenta con servicios eficientes de acueducto y alcantarillado, no ha perdido la cultura de extracción de agua subterránea por medio de pozos domésticos de poca profundidad y la de utilización de pozos sépticos que presentan malos diseños; los pozos son excavados sobre la formación San Luis y la proximidad del nivel freático a la superficie implica que los contaminantes ingresan de manera directa sobre el recurso hídrico subterráneo. Teniendo en cuenta el modelo hidrogeológico regional, la Formación San Andrés y la Formación San Luis están conectadas hidráulicamente, y la tendencia regional del flujo es radial hacia el mar, por lo cual la contaminación generada en el acuífero San Luis no afectaría en teoría al acuífero San Andrés. Sin embargo, es este acuífero en donde se localiza la población que no cuenta con servicios de alcantarillado, donde se desarrollan las actividades de agricultura y porcicultura. Debido a esta situación, se cuenta en su gran mayoría con pozos sépticos construidos sin fondo, posibilitando la generación de residuos contaminantes que pueden ser arrastrados por el agua lluvia hacia el acuífero San Andrés y transmitidas hidráulicamente a la Formación San Luis.

4. OBJETIVO GENERAL

1. Evaluar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo físico para los acuíferos kársticos de la isla de San Andrés, Colombia, usando tecnologías de información geográficas.

4.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el cálculo de amenaza, vulnerabilidad y riesgo físico por contaminación de los acuíferos Kársticos de la isla de San Andrés, mediante la aplicación de metodologías conocidas.

2. Generar mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por contaminación de los acuíferos Kársticos

3. Implementar un SIG para el análisis de la información.

4.2. HIPÓTESIS

1. La contaminación de los acuíferos de la isla de San Andrés, se debe a que las actividades contaminantes se han desarrollado en las áreas de mayor vulnerabilidad.
2. Las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación cuentan con pocos servicios de saneamiento.
3. El uso de herramientas SIG permitirá determinar si las zonas altamente vulnerables están expuestas a amenazas contaminantes de gran potencial

5. MARCO TEÓRICO

5.1. MARCO REFERENCIAL

La primera caracterización geológica y litoestratigráfica de la isla de San Andrés fue realizada por Hubach E., (1956) en Huguett, 1989., en la cual definió tres formaciones: formación de la plataforma marina reciente y subreciente, formación de la plataforma terrestre de edad Pleistoceno, Formación San Andrés de edad Mioceno.

Sin embargo diversos autores como Diezemann, 1957 en Boletín Geológico, vol V. num 1, retomaron esta información y describieron además condiciones hidrológicas, geológicas, climatológicas, hidroquímicas y la sugerencias acerca de la futura construcción de captaciones de agua en la isla. Dentro de los aspectos más importantes de este estudio se encuentra las explicaciones de la porosidad de estos materiales y la relación de esta con la génesis de las rocas coralinas, también presenta las zonas favorables hidrogeológicamente y sus rendimientos basados en pruebas de bombeo. Finalmente, presenta la hidroquímica de algunos puntos.

Por su parte Kocurko M., (1972), describe los ambientes de deposición de las unidades de la isla de San Andrés, desde los escarpes emergidos, playas y escarpes submarinos y los organismos

coralinos asociados, y presenta una datación de estos, con el fin de determinar relaciones estratigráficas y edad de las formaciones presentes en la isla.

Por otro lado, Geister J., y Delgado (1992) realizaron una recopilación de estudios, definiendo cuatro (4) unidades geológicas: Rellenos artificiales y arrecifes de edad reciente, la formación de la bahía, en la cual se diferencian: arenas y gravas de playa, arenas y lodos y derrubios; la formación San Luís de edad Pleistoceno, con dos unidades de terrazas coralinas bajas: reciente y actual, y formación San Andrés de edad Mioceno constituida por moluscos y calizas coralinas. Guzmán G., y Hernández O. (1992) y Vargas G., (1999) realizaron para el INGEOMINAS la cartografía geológica de la isla de San Andrés, diferenciando la formación San Luís y la Formación San Andrés con dos miembros (calcáreo y arcilloso); presentan además una recopilación de los trabajos geológicos anteriores, y se explica el marco sismo-tectónico regional, la geología estructural y con gran detalle se explican las características litológicas de la Formación San Andrés, la Formación San Luís y los depósitos cuaternarios.

En cuanto a los aspectos hidrogeológicos, de forma inicial Diezemann W., y Delgado C., (1957), plantearon aspectos relacionados con el aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la isla de San Andrés y realizaron la descripción de las unidades hidrogeológicas, zonas favorables, rendimientos basados en pruebas de bombeo, junto con algunos resultados hidrogeoquímicos del acuífero. De igual manera, Planhidro (1974), en Rosas y Díaz, 1997, realizó una caracterización hidrogeológica que determinó que la Formación San Andrés está caracterizada por tres facies no diferenciadas: una calcárea cristalina, una calcárea arenosa y una calcárea arcillosa.

En términos más detallados, se encuentran las descripciones de pozos de los estudios de Perfopozos (1985, 1986), en donde se presenta la estratigrafía de los pozos (16, 17, 21, 19, 22) metro a metro, prueba de bombeo, cálculos hidráulicos, entre otros.

Huguett A., (1989) realizó para el INGEOMINAS la compilación de la información hidrogeológica de las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; generó el mapa hidrogeológico con unidades acuíferas, determinando la existencia de dos unidades acuíferas de tipo cárstico, denominadas Acuífero San Luís y acuífero San Andrés. En el primero, la recarga proviene únicamente de lluvia, y en el segundo, el acuífero San Andrés, tiene de tipo libre con extensión y flujo variable debido a que la acumulación del agua subterránea no obedece a la porosidad primaria de la roca sino a la continuidad horizontal y vertical de los planos de diaclasas, fracturas, fallas y a la interconexión y características que tengan las cavidades y conductos formados. Definió también que la zona de explotación más importante está en el centro de la isla, en el valle del Cove, donde se presenta la disolución cárstica más intensa debido a la densidad del diaclasamiento (entre 15 y 70%), por varias fallas presentes en esta zona.

En cuanto a los parámetros hidráulicos de los acuíferos, Ángel C., (1993) determinó que la formación San Andrés reviste mayor importancia hidrogeológica con reservas mínimas totales de 14.75Hm^3 de agua dulce, seguido por la formación San Luís; ambos acuíferos de carácter libre y características cársticas. Se reportan permeabilidades moderadas a altas (3 a 30 m/d) en el Valle del Cove, aumentando en sentido NW-SE. Vásquez E., (1993) presenta la cronología de trabajos geofísicos anteriores, estableciendo el contacto agua dulce agua salada y tiene datos y análisis concretos de la variación lateral de la resistividad en el Valle del Cove. Cañas H., y Martínez C.,

(1993) realizaron pruebas de bombeo en los pozos del campo de pozos del Cove interpretadas según el método de Jacob, las cuales indicaron una alta heterogeneidad de la permeabilidad en el acuífero.

Respecto a la calidad del agua subterránea de los acuíferos, Vargas M., (1993) realizó el estudio hidroquímico de la isla de San Andrés y determinó que las características químicas del agua subterránea están controladas por la composición mineralógica de las unidades, los procesos de fracturamiento y la intrusión marina. El agua del Valle del Cove presenta las mejores características fisicoquímicas (conductividad < 160 mS/m) y bacteriológicas (no coliformes y se mapean líneas de iso-conductividad que muestran tener relación con las características del flujo subterráneo). Por otro lado, INGEOMINAS (1998) Realizó el Estudio de contaminación de acuíferos en la isla de San Andrés "perforación y construcción de la red de piezómetros del sur de la isla de San Andrés", en el cual se reporta la construcción de 12 piezómetros (PP-IV-1, PP-III-1, PP-II-1, PP-I-1, PP-III-6, PP-III-3, PP-III-4, PP-II-2, PP-II-3, PP-II-3, PP-0-1, PP-0-2), con el fin de tener una red de monitoreo de niveles del agua subterránea y de calidad.

Para efectos de conocer el sistema hidrogeológico de la isla Rosas J., y Díaz R., (1997) formularon un modelo hidrogeológico basado en la información hidrológica, geología, geofísica, pruebas de bombeo, características hidráulicas e hidrológicas del acuífero, geoquímica e hidrológica isotópica disponible, y lograron describir el comportamiento hidrogeológico general asociado a las características cársticas de las calizas con dolinas, cavernas y flujos turbulentos.

En términos de evaluaciones de vulnerabilidad a la contaminación Vargas M. Et a.,l (1993) realizaron la evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, cuyo alcance fue el análisis de vulnerabilidad, a través de la metodología aplicada para determinar la vulnerabilidad (GODS Foster Modificada 1987). Se determinó una vulnerabilidad extrema para el acuífero san Luis y alta para el acuífero San Andrés y se identificaron las fuentes potenciales de contaminación entre las que se encuentran el saneamiento in situ (pozos sépticos) y la industria. Los datos utilizados en cuanto a la hidrogeología fueron tomados de los estudios realizados por INGEOMINAS, los niveles del agua subterránea fueron determinados por los datos del inventario de puntos de agua realizado por el estudio hidrogeológico de 1993 y de INGEOMINAS, medidos en 18 piezómetros de la zona norte en 1996. La información sobre suelos se tomó del Estudio Semidetallado de Suelos (IGAC, 1975) y del informe denominado Características Físicoquímicas de los Suelos de la Isla de San Andrés y su relación con contenido de algunos metales pesados (Vargas, O. 1995). La herramienta informática utilizada para la implementación de esta metodología fue ARC/INFO.

Por otro lado, Toro (2000) realizó el análisis de un muestreo de agua subterránea con el fin de evaluar su calidad, concluyendo que no se cumplen las normas colombianas de calidad para las aguas extraídas del acuífero de San Luis. En cuanto al acuífero San Andrés, estos muestran todavía poca evidencia de contaminación, aunque en época de lluvias, la falta de zonas de protección alrededor de los pozos de abastecimiento público facilita el ingreso de sustancias de origen fecal diluidas en el agua lluvia.

Estos trabajos previos sobre la naturaleza de los acuíferos fueron materia prima importante para la primera aproximación del conocimiento del agua subterránea en la isla, e insumo fundamental para la formulación del Plan de Manejo de aguas subterráneas PMAS (2000), el cual en combinación con aspectos sociales y económicos con los técnicos y , permitieron a CORALINA evaluar el problema hídrico de la Isla desde un punto de vista integral y generar un mecanismo de manejo sostenible del recurso, regulando la extracción del agua subterránea por medio de concesiones basadas en pruebas de bombeo.

La información generada en el PMAS se convirtió en insumo del Plan de Manejo de la Cuenca del Cove, mecanismo de regulación que determinó la importancia y los medios de proteger la cuenca del Cove como zona principal de recarga de los acuíferos.

Con la información de los sistemas de monitoreo recopilada de 10 años de implementación del PMAS, se realizó en el año 2013, una nueva aproximación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la isla de San Andrés (Gamboa, L., 2013), por medio de la cual, además de recopilar una serie de datos de piezometría de 14 años, se procesó dicha información para la modelación de la profundidad de la tabla de agua de los años críticos en donde los niveles freáticos presentaron profundizaciones anómalas de acuerdo a los fenómenos de variabilidad climática ENSO (El Niño Southern Oscillation), en su fase extrema cálida o Niño, y adicionalmente se modelaron en dichos años los promedios anuales relacionados con los períodos de lluvia y de sequía, obteniendo con ello varios mapas de izopiezas para los años más críticos, los cuales se utilizaron para la generación de la vulnerabilidad, aplicando el método GOD (Foster et Al 1987 en MENA, G. \$ MONTES, J.,2010), evidenciando con ellos la

reactividad del sistema ante los fenómenos de variabilidad climática, e imprimiéndole un estado variable a la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos.

Pese a lo anterior, la isla no cuenta con ningún ejercicio de estimación del riesgo por contaminación, validado para sistemas kársticos, temas que son de amplia aplicación en Europa, debido a la predominancia de estos sistemas y la riqueza en recurso hídrico que representan.

En este sentido, se cuenta con los métodos propuestos en la Acción COST 620 (Hötzl et al., 2004 en Jiménez et Al, 2010), en los cuales el riesgo de contaminación se obtiene a partir de la combinación de la peligrosidad (amenaza) de las actividades ubicadas sobre el acuífero y de la vulnerabilidad de este último. Esta iniciativa surgió para dar respuesta técnica e integrar las diversas metodologías utilizadas en la evaluación de acuíferos kársticos, basada en unos principios específicos que están en función de la geología, propiedades hidrológicas e hidrogeológicas, propiedades de un sistema independientes de las propiedades de contaminantes específicos, por lo cual se considera pertinente realizar la revisión e implementación de esta metodología en la isla de San Andrés.

En cuanto a la existencia de acuíferos Kársticos en el mundo, en el V Simposio Internacional sobre el Karst, 2014, organizado por investigadores del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga y el Instituto Geológico y Minero de España, en el marco de la Unidad Asociada “Estudios Hidrogeológicos Avanzados” informaron que un tercio de la superficie de Europa está ocupada por este tipo de acuíferos kársticos. Sin embargo, autores como Ford y Williams, 1989, se atreven a decir que los karts ocupan el 20% de la superficie terrestre, y reportan que en Europa abarcan el 35% (Goldscheider, 2005), en Estados Unidos es mayor del

20% (Davis et al., 2002) y en México y Centroamérica, consiste de aproximadamente 23% (Kueny y Day, 2002). Por otro lado, informan que las aguas subterráneas de acuíferos kársticos abastecen alrededor del 25% de la población mundial y que éstos, tienen características muy particulares (Perrin, 2003; Bakalowicz, 2005) que ocasionan su mayor exposición a contaminantes (Veni, 1999; Daly et al., 2002; Davis et al., 2002; Kueny y Day, 2002; Andreo et al., 2006; Nguyet y Goldscheider, 2006; Guo et al., 2007; De Waele et al., 2009).

Debido a la importancia de este tipo de acuíferos en Europa, es allí donde se logran encontrar la gran mayoría de ejemplos de aplicabilidad de metodologías tendientes a determinar vulnerabilidad y riesgo a la contaminación de acuíferos Kársticos, fundamentados en la protección del agua subterránea como objetivo medioambiental prioritario, el cual entró a regir en el marco de las políticas europeas con la entrada en vigor en el año 2000 de la Directiva Marco del Agua, DMA, Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (Unión Europea, 2000), y más específicamente en 2006 con la Directiva 2006/118/CE, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (Unión Europea, 2006),.

Algunos casos estudiados corresponden a los realizados por Jiménez Madrid, A. et al., 2010, en donde se evaluó el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas a los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete (sur de España), para el establecimiento de zonas de salvaguarda de las masas de agua subterránea destinadas al consumo humano. La metodología utilizada para determinar el riesgo de contaminación fue la indicada por la Acción COST 620 desarrollada para la protección de las aguas de los acuíferos kársticos. Se cambió la

vulnerabilidad obtenida mediante el método PI, por la realizada por el método COP debido a que este último ha sido el utilizado por el estado español para determinar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonáticos de todas las cuencas intercomunitarias del territorio nacional, y la aplicación del método COP para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero carbonático de Bauschlotter Platte en Alemania. Se realizó la comparación de resultados con otros acuíferos de del Sur de España (Vías, J.M. et al, 2006), en donde se concluyó con el método COP, que el acuífero es poco vulnerable debido a la capacidad de protección de la zona no saturada y la existencia de sedimentos de loess que hay en gran parte de la superficie del acuífero. En comparación con los casos de España, se concluyó que el principal factor que define la vulnerabilidad esta relacionado con la capacidad de protección de la zona no saturada (O) y la concentración de flujos en superficie (C), entre otros, en esta región.

En este mismo sentido, COST Action 620, 2003, expone varios casos de aplicabilidad de sus metodologías tales como: Sierra de Líbar, Sur de España, en donde aplicaron los conceptos de aplicación del PI y COP para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca, vulnerabilidad específica y mapeo de riesgo y amenaza; Ciudad de Engen, Swabian Alb, en Alemania, en donde se realizó la comparación del método Alemán GLA, con los métodos EPIK y PI para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca y mapeo de amenazas; Nassfeld, Sur de los Alpes, en Austria, donde se realizó una comparación en la aplicación del método Austriaco VURAAS (Vulnerability and Risk analyses for Alpine Aquifer Systems) y el método PI para el cálculo de vulnerabilidad intrínseca y amenaza; Zöbelboden, Alpes del Norte, Austria, en donde se realizó la aplicación del cálculo de vulnerabilidad intrínseca usando el método Time-Input (Kralik & Keimel 2003) y de evaluación de la amenaza, métodos propuestos por COST Action 620; Veszprém-Kádárta

Plateau, Hungría, en donde aplicó el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca y amenaza usando un enfoque preliminar europeo.

En cuanto a bibliografía en áreas tropicales se encuentran casos de aplicabilidad en Centro América, tales como el estado de Yucatán, México (M.C. Torres et al, 2014), en donde se planteó una propuesta metodológica para la evaluación y cartografía del riesgo de contaminación de acuíferos, de las regiones hidrogeológicas "Semicírculo de cenotes" y "Zona costera" en el estado de Yucatán, México. El mapa de riesgo se obtuvo a partir de los mapas de vulnerabilidad y peligrosidad. La vulnerabilidad se evaluó con base en las siete variables que integran el método DRASTIC. El mapa de peligrosidad se elaboró con base en las fuentes potenciales de generación de residuos peligrosos de la región de estudio.

Aguilar et al 2013, en el artículo denominado Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Acuíferos Kársticos, realizó el análisis de los enfoques teóricos y metodológicos utilizados para atender la vulnerabilidad y riesgo a la contaminación de los acuíferos kársticos. Se analizaron los enfoques hidrogeológico europeo, evaluaciones de tierras, el hidropedológico y el geográfico. Del análisis de los modelos, enfoques y metodología discutidos se generó la siguiente recomendación: conformar un equipo de trabajo interdisciplinario para elaborar un modelo conceptual de acuerdo al sitio y a la escala de trabajo, aplicarlo y validarlo.

En cuanto a lo expuesto anteriormente, es fundamental aplicar en el territorio insular de San Andrés, las metodologías recomendadas y probadas para acuíferos Kársticos que tienen amplia aplicación en territorios Kársticos europeos, producto de su alta presencia y explotación, toda

vez que se ha probado que son más adecuados en comparación con los métodos utilizados en acuíferos de formaciones terrígenas e implementar tecnologías de los sistemas de información para espacializar las variables a utilizar de forma que los modelos sean los más aproximados a la realidad, por medio de la validación estadística y geoestadística de los mismos.

5.2 MARCO CONCEPTUAL

5.2.1 DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA

Según la DMA (Directiva Marco del Agua, DMA, Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (Unión Europea, 2000)) una presión es toda aquella actividad originada por el hombre que puede tener un efecto medioambiental desfavorable en el agua (tanto en calidad como en cantidad) y las cuales pueden ser fuentes de contaminación puntuales, fuentes de contaminación difusas, extracciones de agua, recargas artificiales e intrusión marina.

El grupo de estudio de Royal Society (London, 1992) formalmente definió un ambiente de amenaza como “Un evento, o proceso continuo, que de no ser comprendido, conducirá a circunstancias que tienen el potencial a degradar, directa o indirectamente, la calidad del medioambiente”, consecuentemente las amenazas presentan riesgo cuando esto probablemente afecta algo de valor (el objetivo o target).

En relación al agua subterránea, las amenazas pueden ser de actividades humanas o incluso de un área física. No necesariamente comprende una posición fija. Así, para intentar una clasificación

de amenazas, el registro sistemático de amenazas tiene que estar basado en criterios claros. Posibles criterios pueden ser el tiempo y duración de una amenaza y el tipo de actividad humana o la naturaleza de las sustancias dañinas (estado o composición química), y muy importante es conocer dónde ha ocurrido la amenaza.

Por consiguiente, se propone que las amenazas sean clasificadas según el tipo de uso de la tierra, en categorías tales como infraestructuras, industrias y actividades agrícolas. Estas han sido propuestas como Nivel I. (Tabla 1).

Tabla 1 Clasificación de amenazas, Nivel I

Numero	Categorías de Amenaza Nivel I	#	Categorías de Amenaza Nivel II
1		1.1.	Aguas residuales
		1.2.	Residuos municipales
		1.3.	Aceites
		1.4.	Tráfico y transporte
		1.5.	Zonas de recreación
		1.6.	Amenazas diversas
2	Actividades industriales	2.1.	Minería (En operación y abandonadas)
		2.2.	Sitios de excavación
		2.3.	Exploración de gas y petróleo
		2.4.	Plantas industriales (No minería)
		2.5.	Plantas de poder
		2.6.	Almacenamiento industrial

		2.7.	Tratamiento de aguas residuales
3	Ganadería e infraestructura	3.1.	Ganadería
		3.2.	Agricultura

El nivel de categorías II propuesto (Ver tabla 2), usa criterios adicionales, que se distinguen entre amenazas según la fuente principal de posible contaminación (contaminantes sólidos o líquidos) o además relacionada a los tipos de actividades industriales o agrícolas con su espectro correspondiente de agentes contaminadores posibles. Otra subdivisión en el Nivel III se evidencia en la Tabla 3.

En cuanto a los requerimientos de información de dichas amenazas, la evaluación del grado potencial de nocividad para cada tipo de amenazas demanda la siguiente información:

- Proceso o naturaleza de la actividad (Producción, almacenamiento, etc)
- Tipo de sustancias
- La cantidad de las sustancias que pueden ser liberadas
- Edad y estado de instalaciones y plantas

La recolección de esta información puede estar basada en la combinación de varias técnicas como:

- Extracción de mapas topográficos.
- Evaluación de fotografías aéreas
- Recolección de datos desde archivos y agencias
- Campañas de campo

- Preguntas directas con empresas

Tabla 2 Clasificación, Nivel II

N°	Amenazas	Peso	Simbología del mapa		
			Marca	Línea	Sombra
1	Desarrollo estructural				
1.1.	Aguas residuales				
1.1.1.	Urbanizaciones (Fufas de alcantarillado y sistemas de alcantarillado)	35			1
1.1.2.	Urbanizaciones sin sistemas de alcantarillado	70			1
1.1.3.	Casas separadas sin sistemas de alcantarillado	45	1		
1.1.4.	Tanques septicos, pozos y letrinas	45	2		
1.1.5.	Sistemas de irrigación de agua residual y alcantarillados de granjas	55	3		9
1.1.6.	Descargas del interior de una planta de tratamiento	35	4		
1.1.7.	Escapes sobre superficies pavimentadas	25	6	1	
1.1.8.	Descarga de aguas residuales sobre cursos de agua	45	7		
1.1.9.	Pozos de inyeccion de aguas residuales	85	8		
1.2.	Alcantarillados municipales				
1.2.1.	Basureros	40	9		8
1.2.2.	Despósitos de chatarra, estaciones de carga de residuos	40	10		8
1.2.3.	Rellenos sanitarios	50	11		8
1.2.4.	Espolones o acumulaciones de escombros		35	12	8
1.2.5.	Lodos de plantas de tratamiento		35	13	
1.3.	Aceites				
1.3.1.	Tanques de almacenamiento sobre el terreno	50	14		
1.3.2.	Tanques de almacenamiento bajo el terreno	55	15		
1.3.3.	Estacion de gasolina	60	19		
1.3.4.	Caverna de almacenamiento de aceites	35	20		
1.3.	Intalaciones recreacionales				
1.3.1	Urbanizaciones turísticas	30	28		2
1.3.2.	Campamentos	30	29		2
1.4.	Amenazas diversas				
1.4.1.	Cementerios	25	33		10
1.4.2	Entierros de animales	35	34		10
2	Actividades industriales				
2.1.	Minería en operación y abandonada				
2.1.1.	Minerales no metálicos	70	39		7
2.1.2.	Desechos de minas	70	45		6
2.1.3.	Drenajes en minas	65	47	5	
2.1.4.	Lagunas	65	48		6
2.2.	Lugares de excavación				

Nº	Amenazas	Peso	Simbología del mapa		
2.2.1.	Excavaciones y terraplenes	10	49		
2.2.2.	Pozos de grava y arena	30	50		12
2.2.3.	Canteras	25	51		12

Tabla 3 Clasificación, Nivel II

Nº	Amenazas	Peso	Simbología del mapa		
			Marca	Línea	Sombra
2.3.	Explotación de petróleo y gas				
2.3.1.	Pozos de producción	40	52		
2.3.2.	Pozos de inyección	70	53		
2.3.3.	Estación de carga	55	54		
2.3.4.	Tubería de petróleo	55		4	
2.4.	Plantas industriales				
2.4.1.	Hornos de fundición	40	55		4
2.4.2.	Trabajos de acero y hierro	40	56		4
2.4.3.	Procesamiento de metales	50	57		4
2.4.4.	Refinería de petróleo	85	59		4
2.4.5.	Fábrica de Químicos	65	60		4
2.4.6.	Fábrica de cauchos y neumáticos	40	61		4
2.4.7.	Fábricas de papel y pulpa	40	62		4
2.4.8.	Fábricas de cuerno	70	63		4
2.4.9.	Industrias de comida	45	64		4
2.5.	Plantas de energía				
2.5.1.	Fábricas de gas	60	65		4
2.5.2.	Plantas de energía calorífica	50	66		4
2.5.3.	Plantas de energía nuclear	65	67		4
2.6.	Industrias de almacenamiento				
2.6.1.	Stocks de materia prima	60	68		
2.6.2.	Contenedores con sustancias peligrosas	70	69		
2.6.3.	Acumulaciones de ceniza y escoria	70	70		5
2.6.4.	Residuos no peligrosos	45	71		5
2.6.5.	Residuos peligrosos	90	72		5
2.6.6.	Residuos nucleares	100	73		5
2.7.	Tratamiento de aguas residuales				
2.7.1.	Tuberías de agua residual	65		5	
2.7.2.	Superficie de embalses de industrias de aguas residuales	65	74		9
2.7.3.	Descarga de plantas de tratamiento	40	75		
2.7.4.	Pozos de inyección de aguas residuales	85	76		
3	Ganadería y Agricultura				
3.1.	Ganadería				

N°	Amenazas	Peso	Simbología del mapa		
3.1.1.	Graneros de animales	30	77		
3.1.2.	Granja industrial	30	79		
3.1.3.	Tanques de almacenamiento de estiércol	45	81		
3.1.4	Áreas de pastoreo intensivo	25			14
3.2.	Agricultura				
3.2.1.	Campos abiertos	25	82		
3.2.2.	Campos cerrados	20	83		
3.2.3.	Reservas de fertilizantes y pesticidas	40	84		
3.2.4.	Áreas de agricultura intensiva (Con alta demanda de fertilizantes y pesticidas)	30	85		14
3.2.5.	Irrigación de agua residual	60	88		14

En cuanto a la ponderación o pesos asignados a la amenaza, se deben tener en cuenta diversos factores, tales como problemas económicos, condiciones salud humana y del ambiente, factores de influencia, los cuales incluyen la cantidad y la nocividad o la toxicidad de las sustancias así como una evaluación de todos los factores que influyen en la probabilidad que una liberación pueda ocurrir.

Los pasos siguientes son necesarios en el cálculo de evaluación de amenazas:

- Establecimiento de un sistema de peso el cual permite la comparación entre diferentes tipos de amenazas dentro de un esquema de evaluación relativo, y es conveniente para la formulación y medición de zonas de protección de aguas subterráneas posibles; de esta manera se establece un procedimiento para las amenazas del mismo tipo.
- Desarrollo de un esquema de evaluación para la determinación de la probabilidad que una liberación de contaminante pueda ocurrir en conexión con la amenaza.

- Definición de un algoritmo matemático para el cálculo del grado potencial de nocividad para cada amenaza, considerando los coeficientes de peso así como la probabilidad para representar la probabilidad de un acontecimiento de contaminación.

El procedimiento de asignación de pesos se debe establecer con el criterio principal de la toxicidad de sustancias relevantes asociadas con cada tipo de amenaza, así como sus propiedades en cuanto a solubilidad y movilidad; esto determina el coeficiente de peso o " la nocividad de una amenaza (H)".

En primera instancia, se debe evaluar el listado del inventario de amenazas genérico propuesto por WG3, con el fin de evaluar la importancia de cada tipo de amenaza en el área evaluada.

En segunda instancia, los factores de peso preliminares son calculados con una fórmula, que es usada en la conexión con el esquema de evaluación de vulnerabilidad italiano SINTACS (Civita et al. 2000). Este esquema está basado en la Directiva de la Unión Europea sobre las fuentes tóxicas de contaminación.

Un "Índice de contaminación (DCI)" se calcula para cada amenaza, sumando los "impactos medioambientales potenciales causados por actividades específicas humanas (ICEI)", que son considerados los parámetros más importantes para evaluar el grado de nocividad para aguas subterráneas. Los diferentes impactos medioambientales son agrupados según la clasificación de la Unión Europea de amenazas excesivas, y la demanda de agua generada por las actividades humanas. De esta forma se consideran sustancias especiales y peligrosas, aguas negras orgánicas

y no orgánicas, demanda de agua y la contaminación superficial. El impacto medioambiental asociado con cada una de estas causas de impacto es asignado un puntaje en los límites de 0 a 3 según la experiencia general sobre impactos ambientales.

Al finalizar las evaluaciones por expertos se obtendrá:

- Desarrollo de un esquema de evaluación para la determinación de la probabilidad que una liberación de contaminante pueda ocurrir en la conexión con una amenaza
- Definición de un algoritmo matemático para el cálculo del grado potencial de nocividad para cada amenaza considerando los coeficientes de peso así como una probabilidad para representar un acontecimiento de contaminación.

El cálculo del índice de amenaza (HI) describe el grado de nocividad de cada amenaza. Para su cálculo recomiendan la siguiente fórmula:

$$HI = H \times Q_n \times R_f \quad (1)$$

HI es el índice de la amenaza

H es el valor de peso de cada amenaza asignado en la tabla

Q_n es la intensidad de la contaminación que se encuentra entre 0.8 y 1.2

R_f el factor de reducción, definido como la probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación.

La evaluación de la amenaza de cada una de las presiones se efectúa según la metodología propuesta en la Acción COST 620 (Hötzl et al., 2004 en Jiménez, A. et al., 2010), la cual se basa en los tres parámetros mencionados anteriormente: nocividad de la actividad contaminante (H), intensidad de la contaminación (Qn) y probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación (Rf).

Teniendo en cuenta lo anterior, con el fin de determinar las zonas de amenaza, es necesario levantar un inventario de información en campo relacionada con puntos de contaminación claves que puedan estar vertiendo contaminantes a superficie y que tengan potencial de ser arrastradas hacia los acuíferos por infiltración. El valor de H viene definido por el método, puntuación realizada por un comité de expertos europeos, con valores comprendidos entre 10 y 100 para cada actividad. Los otros dos factores Qn y Rf permiten matizar en alta o baja la valoración inicial. El factor Qn varía entre 0,8 y 1,2 y en este estudio se ha puntuado según la dimensión del peligro a partir de su identificación en el campo, mientras que al factor Rf (cuyo valor varía entre 0 y 1) se le ha dado la mayor puntuación con objeto de no disminuir la peligrosidad de la actividad, tal como recomienda el método, ya que no existen datos suficientes que demuestren que la probabilidad de contaminación sea baja.

El índice de peligrosidad HI se obtiene mediante el producto de los tres factores y puede variar entre un valor mínimo de 0 y un máximo de 120 (Tabla 4). Para la determinación de parámetro H, será necesario generar una tabla de ponderación adecuada para el área de estudio, como por ejemplo, la referenciada en COST Action 620, en donde se plantean las amenazas dentro del sitio de prueba de Nassfeld identificadas y evaluadas según el inventario de peligros instalados

por WG3. El factor Qn, fue determinado evaluando el tamaño relativo de la amenaza en comparación con la ocurrencia promedio. El factor de reducción (Rf), describe la probabilidad de la contaminación y puede ser determinado empíricamente.

Tabla 4 Tipos de amenazas dentro del sitio de prueba de Nassfeld, identificadas y evaluadas según el inventario de peligros instalados por WG3 (Tomado de COST Action 620).

Nº	Amenazas	ClasificaciónQn	Rf	Indice de peligrosidad HI	Indice de peligrosidad Class
1	Desarroyo Estructural				
1.1.	Aguas residuales				
	Tanques septicos, letrinas y pozo	0.9	0.5	16	1
	Plantas de tratamientos sin etapa biologica	0.8	0.5	8	1
	Escorrentia en superficies pavimentadas	1.2	0.9	27	2
	Descarga de agua residual dentro de cursos de agua	0.8	0.6	19	1
1.2.	Combustibles				
	Tanques de almacenamiento sobre el suelo	0.8	0.5	16	1
1.3.	Trafico y transporte				
	Carretera sin seguridad	0.85	0.8	27	2
	Areas de parqueo de carros (Sin seguridad)	0.8	0.8	19	1
1.4.	Instalaciones recreacionales				
1.5.	Diversas amenazas				
	Estaciones de transformación	0.8	0.5	14	1
2	Actividades industriales				
2.1.	Sitios de excavaciones				
	Pozos de grava y arena	0.8	0.5	12	1
2.2.	Tratamiento de aguas residuales				
	Tuberia de aguas residuales	1	0.6	39	2
3	Ganaderia y Agricultura				
3.1.	Ganaderia				
	Graneros	1.1.	1.	28	2
	Tanques o piscinas de estiercol	0.8	1	36	2
3.2.	Agricultura				
	Reservas de fertilizantes y pesticidas	0.8	0.6	19	1

5.2.2 DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Los métodos para evaluar la vulnerabilidad se pueden clasificar en 3 grupos de acuerdo a la metodología adoptada, los cuales son (Cerros, 2007 en Mena G., & Montes J., 2010):

- **Ambientes Hidrogeológicos:** Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos.
- **Modelos Analógicos:** Utilizan expresiones matemáticas para parámetros claves (tales como el tiempo de tránsito promedio en la zona no saturada) como un indicador del índice de vulnerabilidad.
- **Sistemas Paramétricos:** Utilizan parámetros convenientemente seleccionados para representar la vulnerabilidad, a los cuales les asignan distintos rangos e interacciones para generar un índice de vulnerabilidad absoluto o relativo.
- **Modelos de simulación,** este método es muy apropiado para analizar situaciones puntuales o con poca extensión espacial.

Los métodos estadísticos o de monitoreo no permiten determinar la vulnerabilidad, sino que se utilizan para realizar estudios probabilísticos, que evalúen la posible dispersión del contaminante.

COST Action 620, 2003, desarrolló una aproximación para la cartografía de la vulnerabilidad intrínseca para acuíferos kársticos, basada en unos principios específicos que están en función de la geología, propiedades hidrológicas e hidrogeológicas, propiedades de un sistema independientes de las propiedades de contaminantes específicos. Los principales factores que definen la vulnerabilidad intrínseca, son capas superpuestas, concentración del flujo, régimen de precipitación y las propiedades propias de los acuíferos, que en este caso se relacionan con el grado de desarrollo de la red de karts. Estos métodos hacen parte de los utilizados alrededor de toda Europa.

En este mismo texto se exponen los diferentes métodos que pueden ser utilizados con este fin:

- Métodos especialmente usados en Karts (Ejemplo: Método EPIK, DOERFLIGER & ZWAHLEN 1998 en COST Action 620, 2003)
- Métodos aplicables a todos los tipos de acuíferos pero que proveen herramientas metodológicas para karts (Ejemplo: Método PI, GOLDSCHIEDER et al. 2000 en COST Action 620, 2003).

COST 620 propone la utilización del segundo método, el cual es de mayor aplicabilidad debido a que existen muchas condiciones intermedias como las presentadas entre una roca muy fracturada y un acuífero carbonatado extremadamente karstificado, formas transitorias entre acuíferos granulares y kársticos, por ejemplo, una grava carbonatada karstificada o dolimitas intensamente fracturadas, varios tipos de acuíferos en una área los cuales interactúan en algunos casos, por

ejemplo acuíferos granulares superponiéndose sobre acuíferos kársticos y primordialmente que los métodos aplicables para todo tipo de acuíferos son más aceptados y aplicados por planificadores del territorio.

Por otra parte, también se plantean los factores determinantes a considerar para el mapeo de la vulnerabilidad en acuíferos kársticos tales como overlying layers (O), concentración del flujo(C), régimen de precipitación (P) y el desarrollo de la red de karts (K). O y P son factores núcleo necesarios para resultados del mapeo; los otros factores son periféricos.

Se concluyó por ejemplo, que sólo el método EPIK (Doerfliger and Zwahlen 1998) era totalmente orientado a karst y que otros métodos que habían sido usados en karst eran las adaptaciones de métodos diseñados para el empleo en ambientes de intercomunicación porosos o fracturados.

Por otra parte, se considera que el método de PI desarrollado por Goldscheider (2002) usa un número mínimo de componentes: la cubierta protectora, P, y la infiltración condicional. Este método también se desarrolló específicamente para acuíferos kársticos; sin embargo, es esencialmente el mismo término conceptual. El factor P, describe la función prospectiva de las capas entre la superficie de la tierra y la tabla de agua subterránea- el suelo, subsuelo, las rocas no kársticas y la zona no saturada de lecho kárstico. El factor I, describe las condiciones de infiltración, particularmente del grado las cuales la cubierta protectora es sobrepasada como resultado de la superficie lateral y el flujo subsuperficial en las captaciones y zonas deprimidas.

El método COP por su parte, relacionado también en COST 620, sirve para mapear la vulnerabilidad intrínseca. Fue desarrollado por el grupo de hidrogeológica de la Universidad de Málaga (Vías et al. 2002 en COST Action 620, 2003). La vulnerabilidad es evaluada teniendo en cuenta la función prospectiva de overlying layers (O), la concentración del flujo (C) y la precipitación. Los factores O y C, son cuantificados de un modo similar pero ligeramente simplificado como es hecho en el método de PI. El factor O, toma en consideración el espesor de cada capa, la textura del suelo, la litología y la fracturación y las condiciones de confinamiento en el acuífero. El factor C, tiene en cuenta la presencia de zonas deprimidas, la pendiente y la vegetación. EL factor P, es evaluado con base en la profundidad de precipitación anual y la intensidad de precipitación (Figura 1).

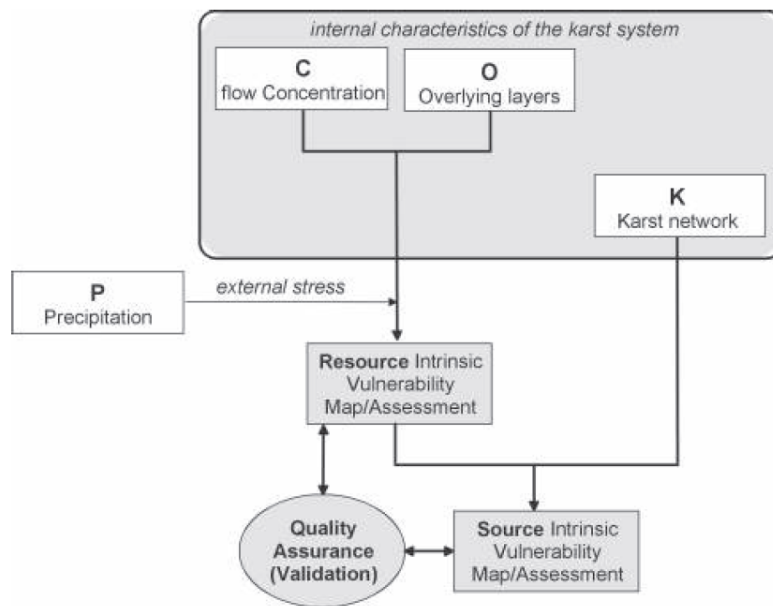


Figura 1 Creación de recursos y fuentes de mapas de vulnerabilidad por la combinación de los factores O, C y K

Para efectos de evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el área de estudio se evaluó la posibilidad de aplicar métodos establecidos por COST Action 620. Sin embargo, los mismos presentaron varios inconvenientes en cuanto a la información disponible en la isla de San Andrés.

COST Action 620, reporta que el método COP tiene varias ventajas respecto a los otros, debido a que ha permitido hacer comparaciones en zonas con diversas características climatológicas, hidrogeológicas y geológicas e incluso con otros métodos, lo que ha permitido realizar comprobación de procedimientos. El método ha sido validado por test de trazas y herramientas hidrogeológicas tales como hidrodinámica, hidroquímica e isotopos, sin embargo el parámetro O de estratos suprayacentes requiere información que en la actualidad no ha sido cartografiada para la isla, tal como el espesor del suelo, por otro lado en cuanto al parámetro C de concentración de flujo este requiere la cartografía de morfología kárstica al detalle, la cual a la fecha no cuenta con información.

Se descartó, por otro lado, los métodos EPIK y PI, propuestos en COST Action 620, debido a que aunque el primero está diseñado específicamente para acuíferos kársticos y tiene variables de gran importancia, la isla no cuenta con la disponibilidad o el levantamiento de la información relacionada con Epikarts acerca del desarrollo o conexión de las redes kársticas, y con presencia o ausencia de red kárstica y grado de desarrollo de esta; ya que por un lado en cuanto a la identificación directa, de cuevas, sumideros y sistemas de cuevas activos no se cuenta con información completa, y por otro, en cuanto a los métodos indirectos para determinar la red los hidrogramas de flujo aunque podrían construirse, estos tienen limitaciones en áreas donde la

evapotranspiración es importante, como en el caso de San Andrés. El tiempo de tránsito medio basado en ensayos de trazadores, tampoco puede ser implementado en este momento debido a que los ensayos realizados a la fecha no han arrojado información de velocidad o dirección del flujo.

Respecto al método PI, que incluye parámetros tales como la efectividad de la cubierta protectora, requiere además del espesor de la misma, la conductividad hidráulica de los estratos situados entre la superficie del terreno y la superficie del agua subterránea, variable no cuantificada hasta el momento en San Andrés. De igual forma, el factor que indica el grado en que la cubierta protectora es traspasada por concentraciones de flujo superficiales requiere la conductividad hidráulica del suelo saturado, variable no calculada debido a que los ensayos de pozos con pozo de observación no han arrojado resultados capaces de generar esta información. Por tanto, se utilizó el método genérico o aplicable a todo tipo de acuíferos denominado GOD, con el fin de realizar comparaciones con el comportamiento real de los acuíferos en la isla de San Andrés y definir el que más se acerque a dichas condiciones.

5.2.2.1 Método Paramétrico GOD

Mediante la superposición de las capas de información y la multiplicación de los parámetros “G” “O” y “D”, (ver más adelante) usando Sistemas de Información Geográfica - SIG, se obtiene la zonificación de Vulnerabilidad de los Acuíferos a la Contaminación.

GOD, es un índice utilizado para determinar la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante. Este método establece la vulnerabilidad del acuífero, 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 contaminantes (Agüero y Pujol, 2002; Foster e Hirata, 1988; Vrba y Zoporozec, 1994 en Pérez y Pacheco, 2004).

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área (Bessouat et al., 2001). Para realizar estos se mapas se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG), que es una herramienta diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos de: información geográfica, cartografía digital, bases de datos de atributos y estadísticas, de una manera simultánea y automatizada (López y Granados, 2000 en Pérez y Pacheco, 2004).

En la aplicación de la metodología para determinar la vulnerabilidad se requieren datos geológicos e hidrogeológicos, entre otros, como por ejemplo: la profundidad al agua subterránea, la recarga neta, el medio acuífero, el tipo de suelo, la topografía y el impacto a la zona vadosa. La principal ventaja de estas metodologías, es que no es necesario obtener en campo dichos parámetros lo que implicaría mucho tiempo además de que son costosos. En lugar de esto se hace uso de los datos de dominio público. Los datos necesarios para la aplicación de la

metodología se encuentran principalmente en CORALINA “Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina”, documentos de INGEOMINAS de cartografía hidrogeológica para la isla y diversos documentos técnicos generados que se encuentran en los archivos de CORALINA.

5.2.2.1. Variables a utilizar para análisis de vulnerabilidad a la contaminación

□ Groundwater – G: la condición de confinamiento del acuífero. Este parámetro está definido por el tipo de acuífero y el grado de confinamiento; el tipo de acuífero se puede catalogar de la siguiente manera (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002 en Mena G., & Montes J., 2010):

- Ninguno
- Surgente
- Confinado
- Semiconfinado
- No confinado (cubierto)
- No confinado

Para determinar este parámetro se necesita información sobre la geología local, estudios hidrogeológicos detallados, que estén soportados por estratigrafía proveniente de campañas de perforación de pozos. Este parámetro varía entre 0 y 1.

□ Overall - O: caracterización global de la zona que suprayace al acuífero o no saturada, en cuanto a la naturaleza litológica, al grado de consolidación y el fracturamiento de la roca. (porosidad, permeabilidad, compactación y grado de fracturamiento). Estos valores varían entre 0.4 y 1.0; para la obtención de este parámetro es necesario contar con información hidrogeológica que esté soportada por estratigrafía proveniente de campañas de perforación de pozos

□ Depth - D: Profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados. El índice varía de 0.6 a 1.0 y para la obtención de este parámetro se necesita información sobre redes de piezometría, hidrogeología de la zona y nivelación de los pozos de la red.

5.2.2.2 Rangos de clasificación de vulnerabilidad

□ Acuíferos con Vulnerabilidad Extrema (índices entre 0,7 y 1,0), se consideran susceptibles a la mayoría de contaminantes y con impacto relativamente rápido, en muchos escenarios de contaminación.

□ Acuíferos con Vulnerabilidad Alta (índices entre 0,5 y 0,7), son vulnerables a muchos contaminantes, excepto a los absorbibles y/o fácilmente transformables, en muchos escenarios de contaminación.

Acuíferos con Vulnerabilidad Moderada (índices entre 0,3 y 0,5), son vulnerables a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.

□ Acuíferos con Vulnerabilidad Baja (índices entre 0,1 y 0,3) son vulnerables a contaminantes conservativos, cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continúa durante largos períodos de tiempo.

□ Acuíferos con Despreciable Vulnerabilidad (índices entre 0 y 1), las capas confinantes no permiten un flujo significativo hacia el acuífero.

El método tiene una estructura simple y fue desarrollado específicamente para zonas cuya información acerca del subsuelo y sistemas de agua subterránea es escasa (Custodio, 1995 en Mena G., & Montes J., 2010). (Ver figura 2)

La estimación del índice de vulnerabilidad GOD involucra una serie de etapas concretas (Foster et al., 2002 en Mena G., & Montes J., 2010):

1. Identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0.0 a 1.0.

2. Especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del

Acuífero en términos de:

a. Grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras).

b. Tipo de litología (considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad de la matriz y contenido de humedad en la zona no saturada o retención específica) y, asignar un índice a este parámetro en una escala de 0.4 a 1.0.

3. Estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0.6 a 1.0.

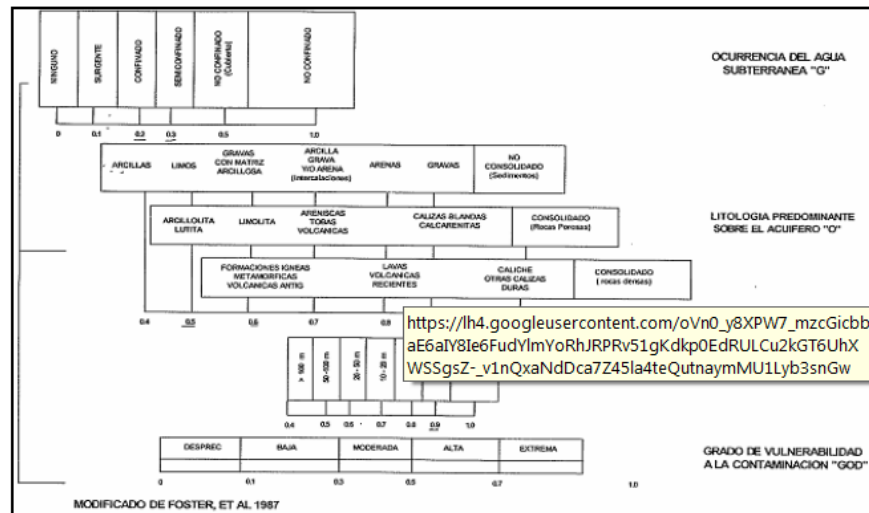


Figura 2 Sistema de indexación GOD, para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación.

5.2.3 DETERMINACIÓN DEL RIESGO

La evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas ha sido abordada por diferentes autores sin existir consenso en los factores a analizar ni en el método a utilizar (Aller et al., 1987; Foster, 1987; Foster e Hirata, 1988; Civita y de Maio, 1997; Ducci, 1999; Hötzl, 2004 en Jiménez, A. et al., 2010).

En el modelo *origin-pathway-target* (COST Action 620), el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas depende de tres elementos:

- El peligro o amenaza por una actividad potencial de contaminación (equivalente de origen)
- La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del agua subterránea (equivalente a Pathway)
- Las potenciales consecuencias de un evento de contaminación (Target u objetivo es el agua subterránea)

En el contexto de protección del agua subterránea en karst, la evaluación de riesgo requiere:

- Identificación de los peligros potenciales.
- Análisis de los impactos potenciales de las amenazas sobre las aguas subterráneas. Esto requiere de concentración y cantidad de contaminantes. Un sistema de clasificación y de peso de las amenazas puede ayudar.

- Información sobre las características hidrogeológicas de materiales geológicos bajo peligro, que influyen en el movimiento de contaminante y la atenuación. Esto es evidenciado por la vulnerabilidad del agua subterránea mediante mapas de vulnerabilidad o evaluaciones de vulnerabilidad.
- Información sobre el valor del agua subterránea; los karst son considerados con altos valores.

Sin embargo, para efectos del presente trabajo se implementará la valoración del índice de intensidad del riesgo (RII), indicada por Hötzl et al. (2004) en el marco de la Acción COST 620, para la generación del mapa del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Este método forma parte del modelo tipo “Origen-Pathway-Target”, donde la contaminación de la misma (target) se evalúa a partir de las fuentes potenciales de peligro (origen) y vulnerabilidad del acuífero (pathway) (Daly et al., 2002 en Jiménez, A. et al., 2010). (Ver tabla 5)

Este índice se obtiene a partir del cociente entre el índice de vulnerabilidad obtenido con el método PI y el índice de peligrosidad (HI) definido en el apartado anterior:

$$RII = (1 / HI) \cdot PI (2)$$

Para la realización de este trabajo se ha considerado más apropiado realizar la modelación del índice de vulnerabilidad generado por medio de la metodología GOD, debido a que fue el primer método utilizado en la primera aproximación de vulnerabilidad realizada para la isla de San

Andrés, y debido a que el método COP propuesto por Acción COST 620, para acuíferos kársticos, no pudo ser aplicado por información insuficiente.

Las diferentes cartografías temáticas se obtendrán a partir de la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para la puntuación, superposición de capas así como su tratamiento conjunto, se utilizarán herramientas de análisis espacial del software ArcGis.

Tabla 5 Límites del índice de intensidad del riesgo y clases de riesgo propuestos.

ÍNDICE COP		ÍNDICE HI		1 / HI	RII= COP * 1 / HI	Clases Riesgo
Factor	Clases	Factor	Clases			
4-15	Muy baja	0-24	Muy baja	>0,042	>0,168	Muy bajo
2-4	Baja	24-48	Baja	0,042-0,021	0,168-0,042	Bajo
1-2	Moderada	48-72	Moderada	0,021-0,014	0,042-0,014	Moderado
0,5-1	Alta	72-96	Alta	0,014-0,010	0,014-0,005	Alto
0-0,5	Muy Alta	96-120	Muy Alta	<0,010	<0,005	Muy alto

Tabla 2. Límites del Índice de intensidad del riesgo (RII) y Clases de riesgo propuestos en este trabajo
 Table 2. Limits of Risk Intensity Index (RII) and Risk category proposed in this work

5.3 HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

5.3.1 Perforación de pozos

El método más seguro para conocer las características de las formaciones que yacen por debajo de la superficie terrestre del terreno, es el de perforar a través de éstas, obteniendo muestras geológicas mientras se perfora y llevando un registro litológico del pozo (Johnson División OUP Inc, 1975 en Mena G., & Montes J., 2010).

Para efectos del presente estudio se utilizaron las descripciones de pozos de los estudios de Perfopozos (1985, 1986), en donde se presenta la estratigrafía de los pozos (16, 17, 21, 19, 22) metro a metro, prueba de bombeo, cálculos hidráulicos, entre otros e información recopilada del estudio de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010.

5.3.2 Pozos de observación

Los pozos de observación corresponden a pozos en los que se puede medir el nivel del agua. Esta medición se hará por medio de un piezómetro que es un tubo de pequeño diámetro conectado hidráulicamente al acuífero y en cuyo interior el agua alcanza una altura que equilibra la presión del acuífero en el punto de conexión (Custodio & Llamas, 2001 en Mena G., & Montes J., 2010). Para efectos del presente estudio se trabajó con el Estudio de contaminación de acuíferos en la isla de San Andrés "Perforación y construcción de la red de piezómetros del sur de la isla de San Andrés en el cual se reporta la construcción de 12 piezómetros (PP-IV-1, PP-III-1, PP-II-1, PP-I-1, PP-III-6, PP-III-3, PP-III-4, PP-II-2, PP-II-3, PP-II-3.PP-0-1, PP-0-2) de INGEOMINAS (1998), e información recopilada del estudio de Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, 2010.

5.3.3 Inventario de pozos

Esta información se obtiene a partir de obras ya construidas correspondientes a pozos del sector comercial que se encuentran registrados en la base de concesiones de agua subterránea en

CORALINA. Dichos pozos en algunos casos cuentan en sus expedientes con información del perfil litológico y análisis de calidad del agua y en la base de datos se registran por medio de seguimientos niveles freáticos, volúmenes de agua y comportamiento de la explotación de agua.

5.3.4 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos no miden directamente el tipo de roca, ni su porosidad, ni la permeabilidad o densidad de la formación. Estos métodos evalúan otras propiedades de los materiales que constituyen el acuífero (Johnson División OUP Inc, 1975). Existe una gran diversidad de métodos de este tipo, pero los que se usan de forma más usualmente cuando se habla de aguas subterráneas son los métodos eléctrico, resistivo y método de refracción sísmica.

Dentro de los métodos eléctricos el que más utiliza es el método eléctrico resistivo y la característica física utilizada es la resistividad o resistencia específica de los diferentes terrenos. Este método permite suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad.

En el presente estudio se realizó la revisión de la información de Vásquez E., (1993) en donde presenta la cronología de trabajos geofísicos anteriores, y donde se estableció el contacto agua dulce agua salada y tiene datos y análisis concretos de la variación lateral de la resistividad en el Valle del Cove.

5.3.5 Estudios hidrogeológicos.

En cuanto a los aspectos hidrogeológicos de forma inicial Diezemann W., y Delgado C., (1957), plantearon aspectos relacionados con el aprovechamiento del depósito de agua subterránea dulce en la isla de San Andrés y realizaron la descripción de las unidades hidrogeológicas. De igual manera, en Planhidro (1974) en Biomar, 1991, en Ángel, 1993, en Rosas y Díaz, 1997, se realizó una caracterización hidrogeológica que caracterizó la Formación San Andrés.

Adicionalmente, Huguett A., (1989) realizó para el INGEOMINAS la Compilación de la información hidrogeológica de las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, en donde planteó el mapa hidrogeológico con unidades acuíferas, determinando la existencia de dos unidades acuíferas de tipo cárstico, denominadas Acuífero San Luís y acuífero San Andrés. En la primera la recarga proviene únicamente de lluvia y en la segunda, el acuífero San Andrés, de tipo libre con extensión y flujo variable debido a que la acumulación del agua subterránea no obedece a la porosidad primaria de la roca sino a la continuidad horizontal y vertical de los planos de diaclasas, fracturas, fallas y a la interconexión y características que tengan las cavidades y conductos formados. Define también que la zona de explotación más importante está en el centro de la isla, en el valle del Cove, donde se presenta la disolución cárstica más intensa debido a la densidad del diaclasamiento (entre 15 y 70%), por varias fallas presentes en esta zona.

5.3.6 Mapas geológicos

A través de la cartografía geológica de la superficie, se registra la naturaleza litológica o estratigráfica las características estructurales de los afloramientos de las rocas, y por medio de los perfiles geológicos y los diagramas tridimensionales se puede adquirir una visión adecuada de la geometría de los acuíferos (Custodio & Llamas, 2001 en Mena G., & Montes J., 2010).

Para el desarrollo del presente trabajo se revisó la caracterización geológica y litoestratigráfica de la isla de San Andrés realizada por Hubach E., (1956) en Huguett, 1989., quien definió tres formaciones: formación de la plataforma marina reciente y subreciente, formación de la plataforma terrestre de edad Pleistoceno, Formación San Andrés de edad Mioceno.

Por otro lado Geister J., y Delgado en el año 1992, realizaron una recopilación, definiendo 4 unidades geológicas: Rellenos artificiales y arrecifes de edad reciente, la formación de la bahía, en la cual se diferencian: arenas y gravas de playa, arenas y lodos y derrubios la formación San Luís de edad Pleistoceno, con dos unidades de terrazas coralinas bajas: reciente y actual y formación San Andrés de edad Mioceno constituida por moluscos u calizas coralinas. Guzmán G., y Hernández O. (1992) y Vargas G., (1999) realizaron para el INGEOMINAS la cartografía geológica de la isla de San Andrés, diferenciando la formación San Luís y la Formación San Andrés con dos miembros (calcáreo y arcilloso).

5.4 APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) A LA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN

Un SIG es un conjunto informatizado de datos, que representa la realidad posibilitando la modelización de eventos a futuro, es decir; un conjunto de datos referenciados a puntos territoriales o espaciales que permiten la obtención de información indispensable para todo tipo de planificación y evaluación de gestión (Duarte et al, 2005 en Mena G., & Montes J., 2010).

En este sentido, la aplicación de las herramientas suministradas por el SIG permite evaluar la vulnerabilidad, amenaza y riesgo de contaminación, ya que es posible realizar la superposición de información temática solicitada por las diversas metodologías, organizar la información requerida y visualizar la información de manera práctica para su utilización.

5.4.1 Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de amenaza de acuíferos

Para calcular la amenaza con ArcGIS se deben seguir 5 pasos:

Paso 1. Construir un mapa de puntos que representa las amenazas inventariadas a lo largo de varios años. Para efectos de la creación de esta tabla se recopiló la información de diversos inventarios realizados por CORALINA, se unificaron atributos como categoría, nombre, localización y coordenadas.

Paso 2. Definir el área de influencia de cada punto de acuerdo a las características de los mismos y generar un Buffer correspondiente a estos valores. Para ello se utiliza la herramienta Geoprocessing/Buffer

Paso 3. Realización de un Join entre el inventario de amenazas y el mapa de Uso y Cobertura del Suelo, con el fin de realizar la calificación respectiva.

Paso 4. Realización de operación matemática con los valores obtenidos en un nuevo campo de atributos, para la determinación final de Hi.

Paso 5. Reclassificar el mapa obtenido para cada una de las variables de acuerdo a los datos relacionados en la metodología utilizada. Esto se realiza por medio de la función Reclassify de la extensión Spatial Analyst.

El resultado obtenido corresponde a un mapa de amenazas (HI) en donde se observan niveles numéricos del resultado.

5.4.2 Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos

El ArcGIS Desktop es como un conjunto de aplicaciones integradas: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, con las cuales se puede desarrollar actividades o tareas SIG, desde una muy simple hasta una muy avanzada, incluyendo mapeo, administración de datos, análisis geográfico, edición de datos y geoprocesamiento. (<http://www.geoinfo.cl/pdf/ArcView8.pdf>)

Para calcular el índice de vulnerabilidad con ArcGIS se deben seguir 3 pasos en los que se utilizará análisis de superficie (slope), interpolación, reclasificación y álgebra de mapas, funciones de la herramienta Spatial Analyst (Tomado de <http://www.aguaysig.com/2011/02/determinacion-de-la-vulnerabilidad-de.html>).

Paso 1. Construir los mapas que representan la distribución espacial de cada una de las variables, para ello se puede utilizar ya sea métodos determinísticos (IDW, Spline) o geoestadísticos (Krigin).

Paso 2. Consiste en Reclasificar los mapas obtenidos para cada una de las variables de acuerdo a los datos relacionados en la metodología utilizada. Esto se realiza por medio de la función Reclassify de la extensión Spatial Analyst. Para los datos no numéricos como Formación geológica que constituye el acuífero, etc, se le da una valoración al tipo de material de acuerdo a las tablas para construir el raster correspondiente.

Paso 3. Algebra de mapas. Con los mapas ya reclasificados de acuerdo al paso anterior, se debe realizar la suma ponderada de cada uno de ellos. Para ello ArcGis cuenta con la herramienta Raster Calculator de la extensión Spatial Analyst.

El resultado obtenido en el paso anterior se reclasifica de acuerdo a la metodología GOD para finalmente obtener el mapa de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero.

5.4.3 Uso de ArcGis para la elaboración de mapas de riesgo de acuíferos

Para calcular el Riesgo con ArcGIS se deben seguir 2 pasos:

Paso 1. Realización de operación matemática entre los mapas rasters de Vulnerabilidad y Amenaza por medio de la aplicación de la herramienta Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator y de acuerdo a las formulas estipuladas en la metodología.

Paso 2. Reclassificar el mapa obtenido para cada una de las variables de acuerdo a los datos relacionados en la metodología utilizada. Esto se realiza por medio de la función Reclassify de la extensión Spatial Analyst.

El resultado obtenido es el mapa de riesgo por contaminación de los acuíferos.

6 RESULTADOS

6.1. DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA

6.1.1 Procesamiento de bases de datos de fuentes contaminantes, homogenización de la información y sistema de coordenadas. Puntos y polígonos.

6.1.1.1 *Definición de Nivel I, Listado del Inventario de Amenazas*

La categorización de amenazas se realizó con base en los inventarios de puntos contaminantes de CORALINA, relacionados con inventario de aguas residuales, cementerios, estaciones de gasolina, marraneras, plantas eléctricas, pozos comerciales, pozos del acueducto, pozos sépticos, pozos domésticos, red de pozos de calidad, relleno sanitario, residuos sólidos, lixiviados, chatarra, talleres de mecánica y zonas de descarga de aceite, con complementación de interpretación de imágenes satelitales y campañas de campo complementarias (Ver figura 3)

Es importante aclarar que los puntos contaminantes inventariados corresponden a una recopilación de diferentes años, cuya base de trabajo es la hipótesis que cualquier área expuesta en algún periodo de tiempo a una sustancia contaminante puede retener el contaminante y generar contaminación del suelo y zona no saturada y permanencia en el mismo, con potencial de contaminación a futuro producto del arrastre de los contaminantes por efectos del agua lluvia.

Por lo tanto, no se eliminó ningún punto contaminante pese a que en la actualidad algunos ya han sido erradicados por la autoridad ambiental, tal es el caso de las marraneras.

Por otro lado, se incluyó en este inventario los pozos y captaciones de agua subterránea, toda vez que las mismas al no contar con perímetros de protección definidos e infraestructura de protección, se convierten en conductos directos para el ingreso de contaminación hacia los acuíferos.

De igual forma, se consideraron en este inventario los pozos sépticos inventariados por la Secretaría de Salud en el año 2005, debido a que técnicamente la gran mayoría presentan diseños inadecuados en donde la base del pozo es construida directamente sobre la roca, posibilitando el ingreso de contaminación al subsuelo, zona no saturada y posteriormente a la zona saturada.

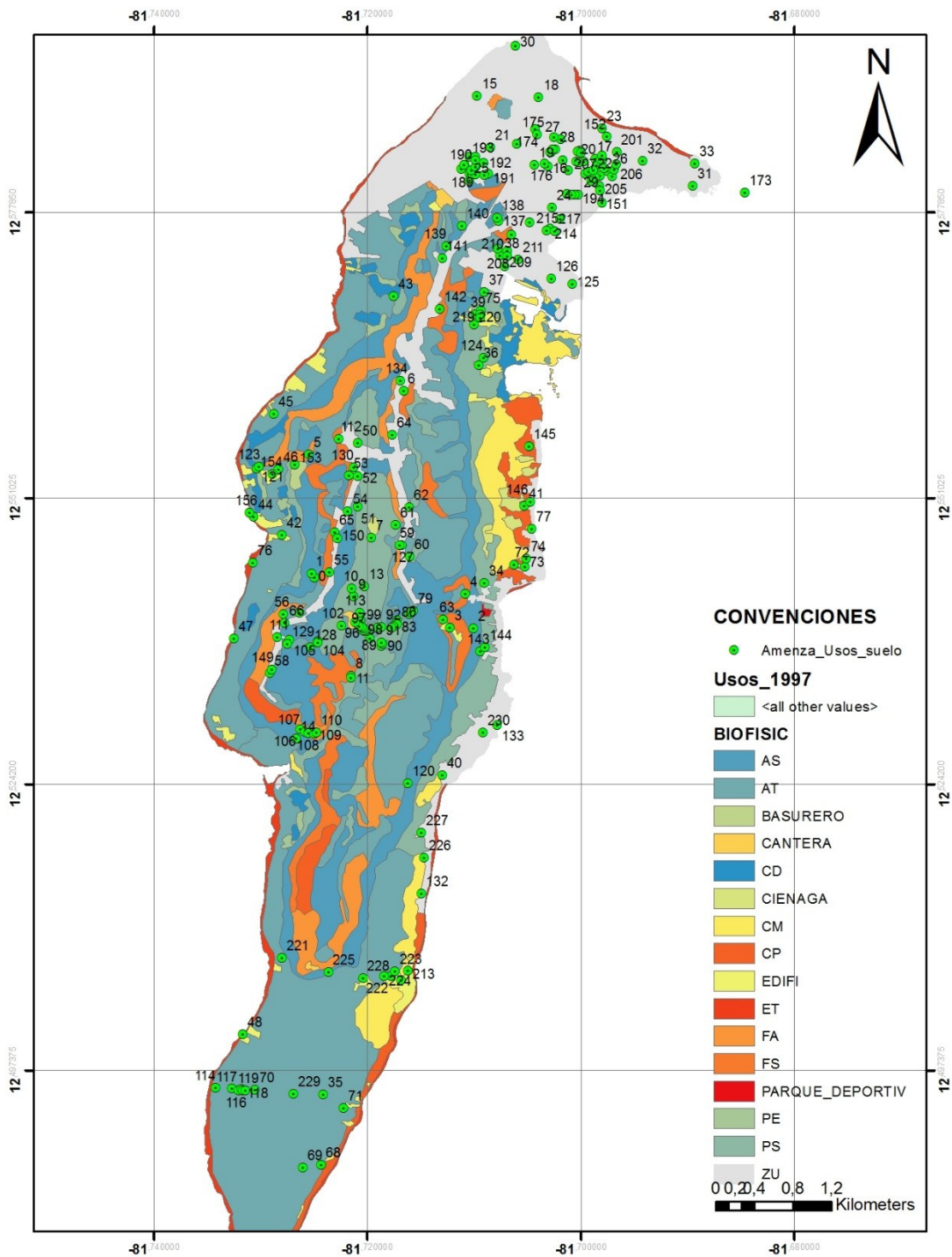


Figura 3 Mapa de inventario de amenazas. Elaboración propia.

6.1.1.2 Definición de Nivel II, tipo de fuente de contaminación. Definición de categorías por tipo de uso o cobertura:

Se realizó la definición de puntos donde han ocurrido fenómenos amenazantes hacia el acuífero, y los mismos fueron clasificados según el tipo de uso del suelo, en categorías tales como zonas de uso agrícola, urbano, zonas para conservación y/o protección, etc. (Ver tabla 6).

Tabla 6 Fuentes de contaminación

FID	Shape *	FID	Codifica	Categoría	Shape	Name	Local	Norte	Este	Latitud	Longitud	Buff	FID	BIOFISIC	TIPO DE UT	SISTEMA DE
0	Point	0	0	Red de pozos calidad	Punto	camilo 1		188343	494415	12,543563	-81,724992	289	0	AS	Zonas para uso agrícola	Agricultura semi-intensiva
1	Point	1	1	Red de pozos calidad	Punto	camilo 3		188347	494390	12,54396	-81,725234	289	1	AT	Zonas para uso agrícola	Agricultura tradicional
2	Point	2	2	Red de pozos calidad	Punto	cc1		188287	496035	12,538824	-81,710051	289	2	AS	Zonas para uso agrícola	Agricultura semi-intensiva
3	Point	3	3	Red de pozos calidad	Punto	cc5		188288	495793	12,538843	-81,71227	289	3	EDIF	EDIFICACION	Urbano
4	Point	4	4	Red de pozos calidad	Punto	cepeda		188323	495958	12,542027	-81,710806	289	4	FS	Zonas para uso agroforestal	Silvopastori
5	Point	5	5	Red de pozos calidad	Punto	jesus c		188471	494387	12,555084	-81,725455	289	5	AT	Zonas para uso agrícola	Agricultura tradicional
6	Point	6	6	Red de pozos calidad	Punto	leroy		188335	495392	12,56106	-81,716615	289	6	CANTERA	CANTERA	CANTERA
7	Point	7	7	Red de pozos calidad	Punto	p10		188383	495006	12,547307	-81,719642	289	7	PS	Zonas para uso pecuario	Ganadería semi-intensiva
8	Point	8	8	Red de pozos calidad	Punto	p13		188240	494774	12,534389	-81,721539	289	8	AS	Zonas para uso agrícola	Agricultura semi-intensiva
9	Point	9	9	Red de pozos calidad	Punto	p15		188323	494815	12,541806	-81,721289	289	9	PS	Zonas para uso pecuario	Ganadería semi-intensiva
10	Point	10	10	Red de pozos calidad	Punto	p15a		188331	494796	12,542572	-81,721478	289	10	PS	Zonas para uso pecuario	Ganadería semi-intensiva
11	Point	11	11	Red de pozos calidad	Punto	p3		188238	494774	12,54206	-81,72153	289	11	FS	Zonas para uso agroforestal	Silvopastori
12	Point	12	12	Red de pozos calidad	Punto	p4		188278	494976	12,537833	-81,719746	289	12	AT	Zonas para uso agrícola	Agricultura tradicional
13	Point	13	13	Red de pozos calidad	Punto	p8		188333	494930	12,54276	-81,720253	289	13	PS	Zonas para uso pecuario	Ganadería semi-intensiva
14	Point	14	14	Red de pozos calidad	Punto	w bent		188176	494202	12,528484	-81,726675	289	14	AT	Zonas para uso agrícola	Agricultura tradicional
15	Point	15	15	Red de pozos calidad	Punto	alicia		188841	496168	12,586748	-81,709718	289	15	AS	Zonas para uso agrícola	Agricultura semi-intensiva
16	Point	16	16	Red de pozos calidad	Punto	ali cai		188767	496881	12,582138	-81,703062	289	16	ZU	Urbano	Urbano
17	Point	17	17	Red de pozos calidad	Punto	ali pp8		188773	497365	12,582313	-81,698631	289	17	AT	Zonas para uso agrícola	Agricultura tradicional
18	Point	18	18	Red de pozos calidad	Punto	ali Sarie b		188838	496798	12,588586	-81,703941	289	18	AS	Zonas para uso agrícola	Agricultura semi-intensiva
19	Point	19	19	Red de pozos calidad	Punto	cliff2		188768	496741	12,58225	-81,704344	289	19	AS	Zonas para uso agrícola	Agricultura semi-intensiva
20	Point	20	20	Red de pozos calidad	Punto	cocal		188771	497173	12,582579	-81,700394	289	20	AT	Zonas para uso agrícola	Agricultura tradicional
21	Point	21	21	Red de pozos calidad	Punto	Don Julio		188767	496292	12,583888	-81,708495	289	21	CD	Zonas para conservación y/o pr	Control de degradación y/o r
22	Point	22	22	Red de pozos calidad	Punto	halley		188756	497411	12,581257	-81,698182	289	22	ZU	Urbano	Urbano
23	Point	23	23	Red de pozos calidad	Punto	isiezo		188805	497436	12,585692	-81,698032	289	23	CD	Zonas para conservación y/o pr	Control de degradación y/o r
24	Point	24	24	Red de pozos calidad	Punto	lab-rosa		188724	496915	12,578284	-81,702683	289	24	ZU	Urbano	Urbano
25	Point	25	25	Red de pozos calidad	Punto	mary ann		188753	496072	12,580806	-81,710464	289	25	ZU	Urbano	Urbano
26	Point	26	26	Red de pozos calidad	Punto	sweet water		188761	497489	12,581683	-81,697473	289	26	ZU	Urbano	Urbano

6.1.1.3 Definición de buffer de acuerdo a la naturaleza del punto y a la información disponible de fuentes contaminantes aledañas (Distancia al punto definido):

Pozos de calidad: Se definió como el radio de influencia del pozo. El radio de influencia es la distancia que alcanza el cono de depresión en el acuífero cuando se bombea un pozo durante un tiempo determinado. Depende de la trasmisividad y del coeficiente de almacenamiento. Se asume para este ejercicio que el radio de influencia es el área que expone a la contaminación a un

punto asociado a un pozo de agua subterránea de la red de calidad, los cuales en general no cuentan con sistema de protección, por lo cual la contaminación que puede darse a sus alrededores sería de forma directa. Para el cálculo de dicho radio se tomó la información obtenida de pruebas de bombeo que se han realizado en la isla y para las cuales se han generalizado valores para los acuíferos de la isla (Ver tabla 7):

Tabla 7 Parámetros hidráulicos obtenidos en pruebas de bombeo

S	Fuente	T (M2/DIA)	Fuente
0,03	Angel, 1993	15,8	Ponce de León y
0,06		1318	Piñeros, 1989
0,042	Hugget & Granados, 1989	37	Hugget & Granados, 1989
0,082		1000	

Se calculó un radio de influencia genérico para todos los pozos con el valor mínimo obtenido de las estimaciones realizadas en años anteriores para el acuífero de la Formación San Andrés, utilizando la fórmula de Cooper y Jacob:

Donde Radio de Influencia R

$$R = 1.5t \sqrt{T/S} \quad (3)$$

T: Transmisividad

S: Coeficiente de Almacenamiento

t: Tiempo

R: 289 metros.

Pozos sépticos: 2 (distancia de pozo a pozo séptico)*profundidad de pozo (asumiendo que pozos artesanales se perforan hasta encontrar la tabla de agua)

Residuos sólidos: 2 (distancia de pozo a zona de disposición residuos sólidos)*profundidad de pozo (asumiendo que pozos artesanales se perforan hasta encontrar la tabla de agua)

Aguas residuales: 2 (distancia de pozo a zona de disposición aguas residuales)*profundidad de pozo (asumiendo que pozos artesanales se perforan hasta encontrar la tabla de agua)

Pozos domésticos: 2 (profundidad del pozo)

Cementerios: por defecto de información se le adjudico 250 m y por la potencialidad de la contaminación.

Marraneras: por defecto de información se le adjudico 100 m y por la potencialidad de la contaminación.

Pozos Acueducto = Pozos de calidad

En cuanto a la ponderación o pesos asignados a la amenaza, se tuvo en cuenta la categoría de la amenaza y el Sistema de Producción obtenido del mapa de uso y cobertura del suelo del IGAC, 1997. Otros factores a criterio del autor, tales como localización y cobertura del sistema de alcantarillado, fueron tenidos en cuenta para valorar los índices.

Se estableció el sistema de peso de las amenazas identificadas de acuerdo a la fórmula:

$$HI = H \times Qn \times Rf \quad (4)$$

HI es el índice de la amenaza

H es el valor de peso de cada amenaza asignado en la tabla

Qn es el factor que se encuentra entre 0.8 y 1.2

Rf el factor de reducción.

En donde la evaluación de la amenaza de cada una de las presiones se efectúa según la metodología propuesta en la Acción COST 620 (Hötzl et al., 2004 en Jiménez, A. et al., 2010), la cual se basa en tres parámetros: nocividad de la actividad contaminante (H), intensidad de la contaminación (Qn) y probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación (Rf). (Ver tabla 8 y Figura 4)

Tabla 8 Evaluación de la amenaza

Amenaza_Usos_end1																					
FID	Shape *	FID	Codi	Categoría	Shape	Name	Local	Nort	Este	Latitud	Longitud	Buffer	FID 1	BIOFI	TIPO DE UT	SISTEMA DE	POZO	H	Qn	Rf	HI
0	Point	0	0	Red de pozos calidad	Punto	camilo 1		188	49441	12,543563	-81,724992	289	0	AS	Zonas para uso	Agricultura semi-intensiv		100	1,1	0,9	99
1	Point	1	1	Red de pozos calidad	Punto	camilo 3		188	49439	12,54396	-81,725234	289	1	AS	Zonas para uso	Agricultura semi-intensiv		100	1,1	0,9	99
2	Point	2	2	Red de pozos calidad	Punto	cc1		188	49603	12,538824	-81,710051	289	2	AS	Zonas para uso	Agricultura semi-intensiv		100	1,1	0,9	99
3	Point	3	3	Red de pozos calidad	Punto	cc5		188	49579	12,538843	-81,71227	289	3	EDIF	EDIFICACION	Urbano		80	1	1	80
4	Point	4	4	Red de pozos calidad	Punto	cepeda		188	49595	12,542027	-81,710806	289	4	FS	Zonas para uso	Silvopastoril		60	1	0,9	54
5	Point	5	5	Red de pozos calidad	Punto	jesus c		188	49438	12,555084	-81,725455	289	5	FA	Zonas para uso	Agrosilvocultural		90	1	0,9	81
6	Point	6	6	Red de pozos calidad	Punto	leroy		188	49536	12,56106	-81,716615	289	6	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
7	Point	7	7	Red de pozos calidad	Punto	p10		188	49500	12,547307	-81,719642	289	7	PS	Zonas para uso	Ganadería semi-intensiva		100	1,1	0,9	99
8	Point	8	8	Red de pozos calidad	Punto	P13		188	49477	12,534389	-81,721539	289	8	FS	Zonas para uso	Silvopastoril		60	1	0,9	54
9	Point	9	9	Red de pozos calidad	Punto	p15		188	49481	12,541806	-81,721289	289	9	PS	Zonas para uso	Ganadería semi-intensiva		100	1,1	0,9	99
10	Point	10	10	Red de pozos calidad	Punto	p15a		188	49479	12,542572	-81,721478	289	10	PS	Zonas para uso	Ganadería semi-intensiva		100	1,1	0,9	99
11	Point	11	11	Red de pozos calidad	Punto	p3		188	49477	12,534206	-81,72153	289	11	FS	Zonas para uso	Silvopastoril		60	1	0,9	54
12	Point	12	12	Red de pozos calidad	Punto	p4		188	49497	12,537833	-81,719746	289	12	AT	Zonas para uso	Agricultura tradicional		50	0,8	0,9	36
13	Point	13	13	Red de pozos calidad	Punto	p8		188	49493	12,54276	-81,720253	289	13	PS	Zonas para uso	Ganadería semi-intensiva		100	1,1	0,9	99
14	Point	14	14	Red de pozos calidad	Punto	w bent		188	49420	12,528484	-81,726675	289	14	AS	Zonas para uso	Agricultura semi-intensiv		100	1,1	0,9	99
15	Point	15	15	Red de pozos calidad	Punto	alicia		188	49616	12,588748	-81,709718	289	15	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
16	Point	16	16	Red de pozos calidad	Punto	al cai		188	49688	12,582138	-81,703062	289	16	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
17	Point	17	17	Red de pozos calidad	Punto	al pp8		188	49736	12,582813	-81,698631	289	17	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
18	Point	18	18	Red de pozos calidad	Punto	al Sarie b		188	49679	12,588586	-81,703941	289	18	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
19	Point	19	19	Red de pozos calidad	Punto	cliff2		188	49674	12,58225	-81,704344	289	19	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
20	Point	20	20	Red de pozos calidad	Punto	cocal		188	49717	12,582579	-81,700394	289	20	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
21	Point	21	21	Red de pozos calidad	Punto	Don Julio		188	49629	12,583888	-81,708495	289	21	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
22	Point	22	22	Red de pozos calidad	Punto	halley		188	49741	12,581257	-81,698182	289	22	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
23	Point	23	23	Red de pozos calidad	Punto	islezo		188	49743	12,595692	-81,698032	289	23	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
24	Point	24	24	Red de pozos calidad	Punto	lab-sosa		188	49691	12,578264	-81,702893	289	24	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
25	Point	25	25	Red de pozos calidad	Punto	mary ann		188	49607	12,580806	-81,710464	289	25	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80
26	Point	26	26	Red de pozos calidad	Punto	sweet water		188	49748	12,581683	-81,697473	289	26	ZU	Urbano	Urbano		80	1	1	80

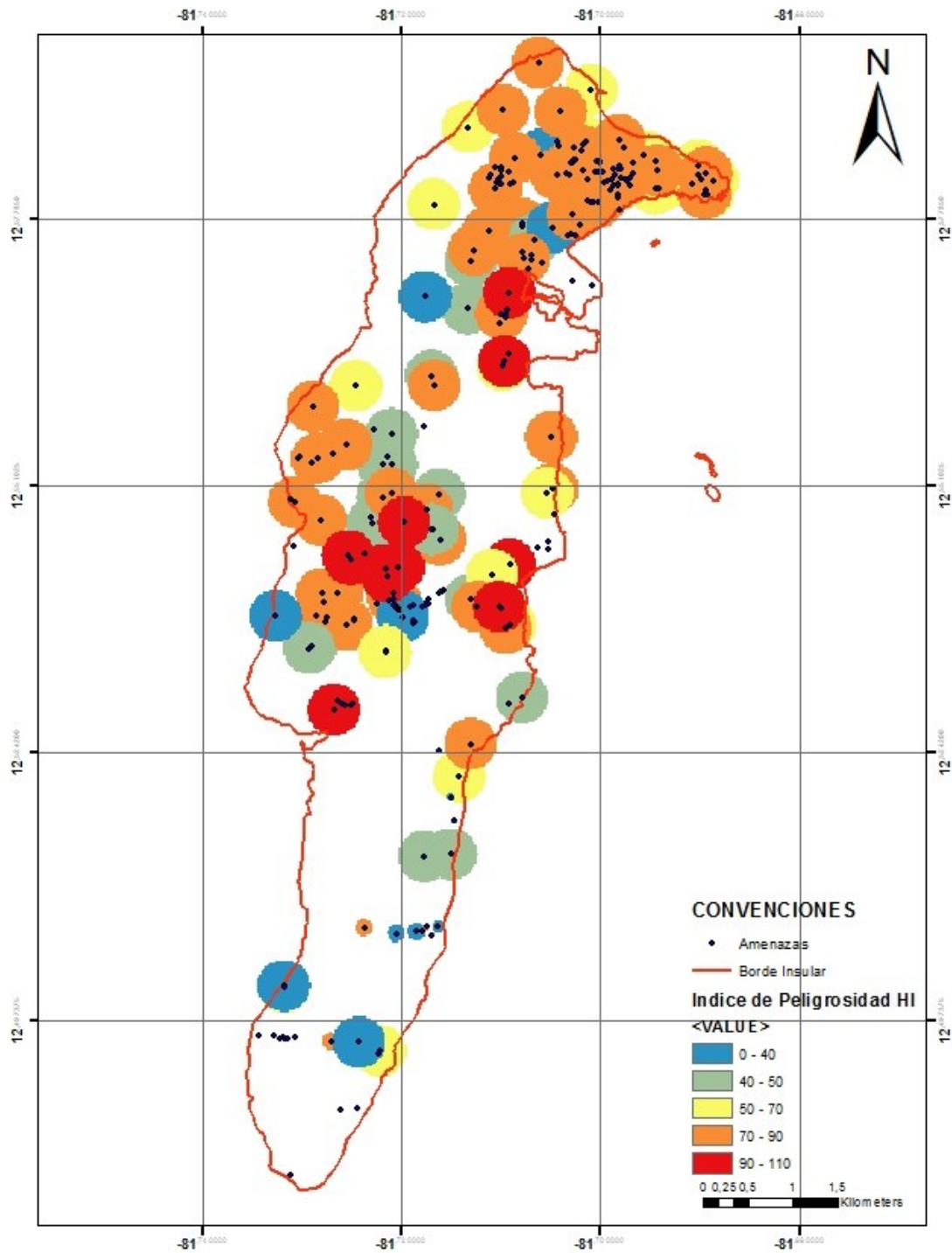


Figura 4 Mapa Índice de Peligrosidad HI (Amenaza). Elaboración propia.

6.2. DETERMINACION DE LA VULNERABILIDAD: PARAMETROS GOD

6.2.1 Groundwater Occurrence (G)

El parámetro G se obtiene a partir del estudio geológico del acuífero, perforaciones, sondeos geofísicos, registros de pozos, estudios hidrogeológicos, etc, lo cual permite establecer el tipo de roca que conforma el acuífero y tipo de acuífero.

El mapa desplegado corresponde a un Shape File de Polígonos (Ver figura 5), por lo cual se procede a convertirlo a Raster, y dado que este mapa no representa valor numérico, lo que se realizará es valorar la litología y reclasificar los valores (Tabla 9). Con ello se obtiene el nuevo mapa Raster de valoración de la litología del acuífero de acuerdo a la valoración de GOD (Ver figura 6)

6.2.2 Overall Lithology (O)

Se refiere al tipo de suelo que compone la zona no saturada. Define la facilidad o dificultad con que podría viajar un contaminante por este medio. La información también se obtiene de estudios geológicos del acuífero, perforaciones, sondeos geofísicos, registros de pozos, etc.

Se utilizó el mapa de polígonos de litología para la isla de San Andrés (Ver figura 7), se realizó su transformación a formato Raster y su posterior reclasificación para la asignación de la valoración GOD para este parámetro (Ver figura 8 y tabla 10).

6.2.3 Depth To Groundwater (D)

6.2.3.1 Descripción de las redes piezométricas de la isla:

6.2.3.1.1 Red de piezómetros de la zona norte

Comenzó sus funciones en el año 1996 y se conformó con 19 pozos de los cuales 12 se encontraban en funcionamiento para el año 2006 y actualmente se encuentran en funcionamiento (Ver Figura 9 y tabla 11).

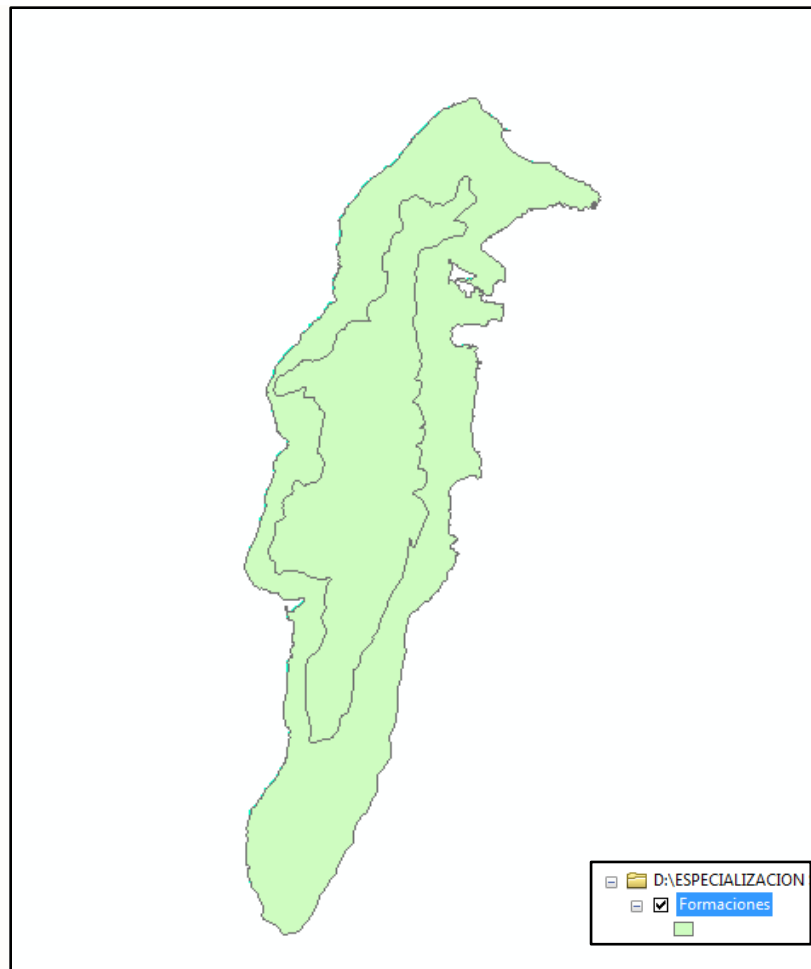


Figura 5 Mapa de polígonos Groundwater. Elaboración propia.

Tabla 9 Tabla de atributos del Shp Groundwather

Table				
Formaciones				
	FID	Shape *	LITOL	AQUAVU98
▶	0	Polygon	Formación San Luis (Pioceno)	6
	1	Polygon	Formacion San Andres	0

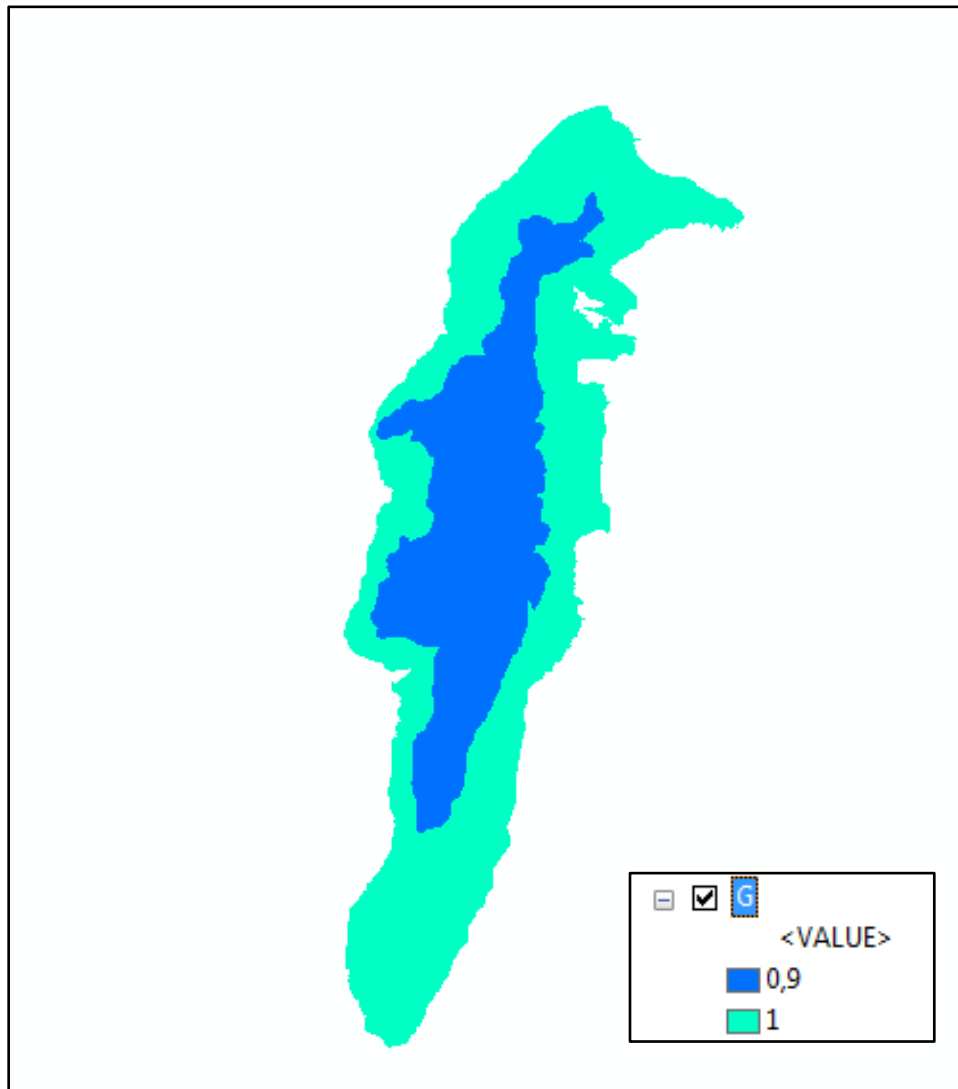


Figura 6 Mapa Raster Groundwather. Elaboración propia.

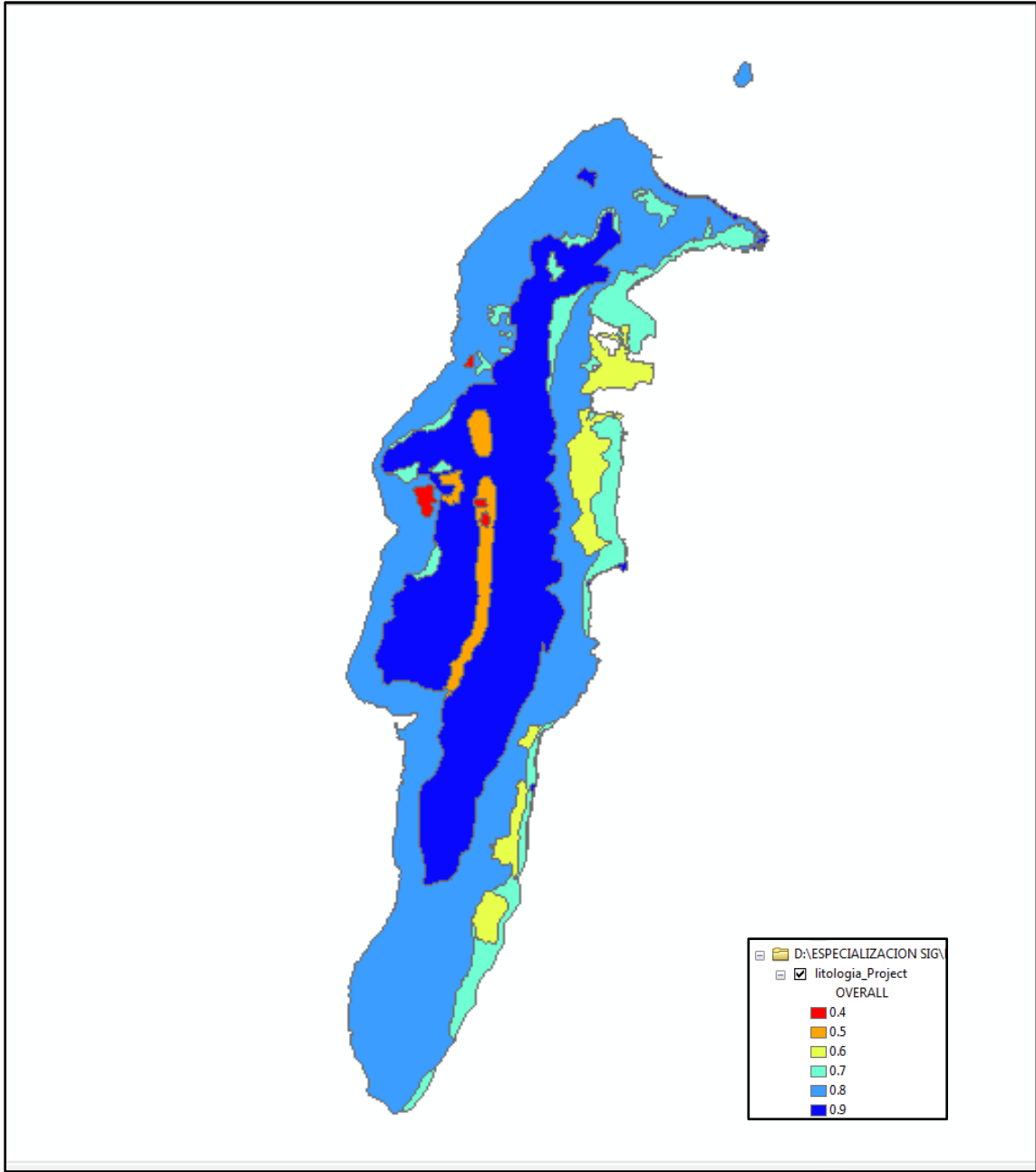


Figura 7 Mapa de polígonos de Overall Lithology. Elaboración propia.

Tabla 10 Tabla de atributos Shp Overall Lithology

Table				
litologia_Project				
FID	Shape *	LITOLO	AQUAVU98	OVERALL
2	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
4	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
16	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
20	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
43	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
44	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
46	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
47	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
48	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
49	Polygon	Arenas_de_playa	6	1.0
50	Polygon	Arenas_de_playa	6	0.7
3	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
5	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
10	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
45	Polygon	Arenas_y_gravas	10	0.7
25	Polygon	Coluviones	8	0.7
33	Polygon	Coluviones	8	0.7
34	Polygon	Coluviones	8	0.7
35	Polygon	Coluviones	8	0.7
36	Polygon	Coluviones	8	0.7
7	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
9	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
11	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
13	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
14	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
15	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
21	Polygon	Depósitos_de_manglar	6	0.6
18	Polygon	Depósitos_lacustres	4	0.4
24	Polygon	Depósitos_lacustres	4	0.4
31	Polygon	Depósitos_lacustres	4	0.4
22	Polygon	Derrubios	6	0.7
26	Polygon	Derrubios	6	0.7
27	Polygon	Derrubios	6	0.7
28	Polygon	Derrubios	6	0.7
32	Polygon	Derrubios	6	0.7
37	Polygon	Derrubios	6	0.7
38	Polygon	Derrubios	6	0.7
17	Polygon	Formación_San_Andrés_(Mioceno)	9	1.0
39	Polygon	Formación_San_Andrés_(Mioceno)	9	1.0
0	Polygon	Formación_San_Luis_(Pioceno)	5	0.9
1	Polygon	Formación_San_Luis_(Pioceno)	5	0.9
29	Polygon	Lagunas	6	0.4
6	Polygon	Relleno_artificial_hidráulico	3	0.7
8	Polygon	Relleno_artificial_hidráulico	3	0.7
12	Polygon	Relleno_artificial_hidráulico	3	0.7

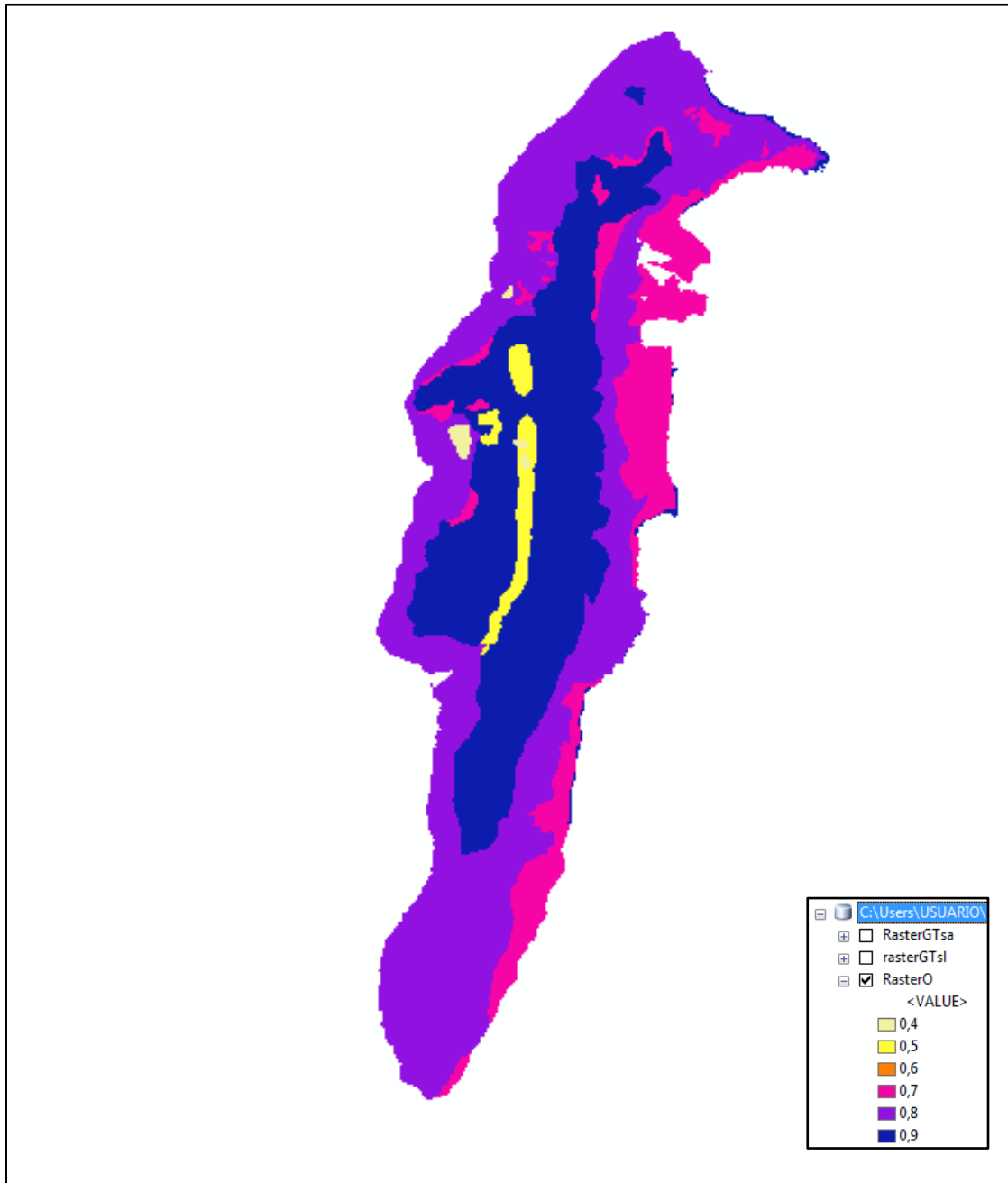


Figura 8 Mapa Raster Overall Lithology. Elaboración propia.

Las situaciones relacionadas con la no funcionalidad de 10 pozos de la red norte, obedecen a su construcción en predios privados que han sido dispuestos para diferentes actividades, las cuales han perjudicado los seguimientos a las captaciones y en muchas ocasiones han sido sellados por los propietarios de dichos predios en proyectos de ampliación de inmuebles. En esta medida, la información valiosa recolectada en dichos monitoreos ha sido interrumpida y por lo tanto los análisis presentan ciertas restricciones en su interpretación por la existencia de series de datos incompletas.

6.2.3.1.2 Red de piezómetros de la Cuenca del Valle del Cove

Esta red fue diseñada y construida por medio de un convenio interinstitucional entre CORALINA e INGEOMINAS en el año 1996. Por medio de dicho convenio fueron perforados 14 piezómetros, monitoreados actualmente (Ver Figura 10 y Tabla 11).

Las situaciones relacionadas con la no funcionalidad de 3 pozos de la red Cove, obedecen a su construcción en predios privados que han sido dispuestos para diferentes actividades las cuales han perjudicado los seguimientos a las captaciones y en muchas ocasiones no se ha permitido el ingreso a los predios por parte de los propietarios. Por otro lado, se han presentado derrumbamientos de algunos pozos los cuales han perdido su funcionalidad, para lo cual es necesario un diagnóstico que permita definir acciones de reperfusión y/o mantenimiento a la estructura interna.

En esta medida la información valiosa recolectada en dichos monitoreos ha sido interrumpida y por lo tanto los análisis presentan ciertas restricciones en su interpretación por la existencia de series de datos incompletos.

6.2.3.2 Análisis Estadístico De Los Niveles

Luego de contar con la revisión realizada a la red de piezometría por A. Piñeros en el año 2006, se procedió a recalcular los valores del nivel freático para la red Norte desde el año 1996 y hasta 2010 y a procesar la información medida desde 1996, analizando estadísticamente las series de los pozos de observación o piezómetros, con el fin de determinar la homogeneidad de la serie de datos y de esta forma obtener los mapas de isopiezas de niveles freáticos promedio para verano e invierno. A continuación se presentan las distribuciones estadísticas realizadas.



Figura 9 Mapa de localización piezómetros red del Sector Norte. Elaboración propia.

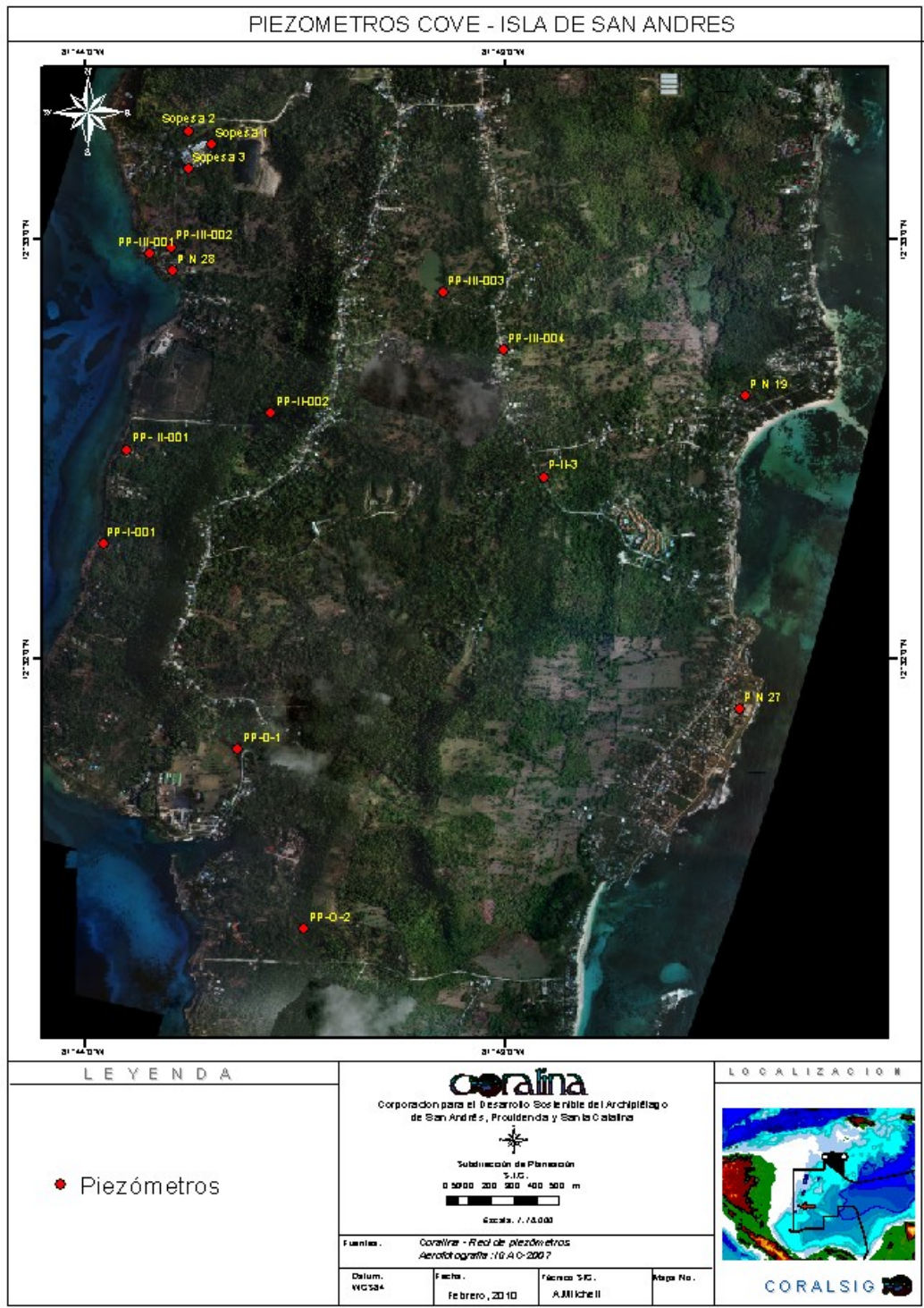


Figura 10 Mapa de localización piezómetros de la Red del Valle del Cove. Elaboración propia.

Tabla 11 Pozos de observación que conforman la red de piezometría

FID	Pozo	X	Y	Sitio	Latitud	Longitud
0	PP-I-001	493569	1882817	Valle de Cove - Modelo Adventista - Casa de Gringos	12,537874	-81,732656
1	PP-III-001	493791	1884094	Valle de Cove - Frente bomba texaco (BOMBA DE LENO)	12,549414	-81,730827
2	PP-II-002	494307	1883380	Valle de Cove - Camilo	12,543063	-81,725979
3	PP-III-002	493887	1884118	Valle de Cove - Frente bomba texaco (DETRμS BOMBA DE LENO)	12,549646	-81,729951
4	PP-III-004	495315	1883642	Valle de Cove-Barack (Av principal)	12,545584	-81,716777
5	PP-IV-001	494029	1885165	Valle de Cove - Cerca casa Museo	12,559101	-81,728818
6	PP-O-2	494410	1881100	Morgaviria	12,522538	-81,724666
7	P-II-3	495480	1883077	Barack (Diagonal entrada Duppy Gully)	12,54052	-81,715173
8	Sopesa 2	493972	1884630	Schooner Bight	12,554272	-81,729254
9	Sopesa	494070	188456	Schooner Bight	12,553722	-81,728338

FID	Pozo	X	Y	Sitio	Latitud	Longitud
	1	,74	7,24			
10	Sopesa 3	493968 ,4	188446 1,6	Schooner Bight	12,552754	-81,72926
11	P 3	496597 ,53	188856 9,09	Sarie Bay, Brenda Hooker (Diagonal Iglesia Hispana)	12,59018	-81,70581
12	P 4	496642 ,85	188844 0,59	Sarie Bay, Alcidez Ramirez (Diagonal Antigua Postobon)	12,589029	-81,705374
13	P 5	495788 ,47	188756 6,93	Dentro de canteras San Andres	12,581022	-81,713069
14	P 6	496688 ,85	188796 8,53	Daniel Lois Soto Mofles, (Antiguo cementerio School House)	12,584783	-81,704876
15	P 7	497243 ,39	188803 3,32	Coliseo Rosado parte occidental	12,585455	-81,699799
16	P 10	497446 ,98	188756 8,37	Restaurante la mamita (Entrada a Caribe Libros)	12,581298	-81,697857
17	P 11	498014 ,9	188760 8,73	Antiguo Hotel Morgan	12,581752	-81,692654
18	P 12	496358 ,83	188672 8,01	Diagonal Parque Archbold (Mauricio Gallardo)	12,573554	-81,707702
19	P 14	496632	188884	Frente del hospital Santander,	12,592652	-81,705534

FID	Pozo	X	Y	Sitio	Latitud	Longitud
		,5	2,86	Cll 3 Cra 19 (Casa del Castillo)		
20	P 15	495572 ,1	188800 9,37	La Rocosa (Circunvalar contiguo casa finca Gallardo)	12,584974	-81,715126
21	P 17	496411 ,16	188819 7,08	Tablitas en predios de la Policia(Vja Areopuerto)	12,586798	-81,70746
22	P Halley	497427 ,7	188756 1,8	Agua pura Halley	12,581236	-81,698033
23	P N 19	496361 ,08	188342 1,04	CAJASAI sede recreacional	12,543759	-81,707148
24	P N 20	498361 ,06	188744 8,53	Conjunto Residencial Bay Point	12,580363	-81,689453
25	P N 21	496153 ,22	188534 8,97	CORALINA nueva sede	12,561096	-81,709365
26	P N 22	497101 ,76	188857 0,7	ESTACION DE BOMBEO No 2 Proactiva	12,590274	-81,701185
27	P N 24	493243 ,2	187782 2,15	Universidada Cristiana	12,492821	-81,734836
28	P N 26	495518 ,66	188039 8,15	Cementerio San Luis	12,51639	-81,714386
29	P N 27	496314 ,24	188203 5,68	Colegio Antonia Santos el Rancho	12,53127	-81,707354

FID	Pozo	X	Y	Sitio	Latitud	Longitud
30	P N 28	493893 ,22	188401 3,01	Escuela Maria Auxiliadora	12,548701	-81,729877
31	P N 29	493593 ,83	187870 6,3	Hotel Sunset	12,500842	-81,731764

6.2.3.3 Análisis de la media aritmética, varianza y la desviación estándar anual para cada piezómetro

Este procedimiento estadístico consistió en tomar cada dato medido sobre el nivel estático a partir de 1996 y de 1999 (para la red del Valle del Cove y para la Zona norte de la Isla respectivamente) hasta 2010.

Con la anterior información agrupada anualmente y por red, se aplicó un modelo estadístico con el cual se obtuvo la media y la desviación estándar. Seguidamente, se graficaron estos parámetros y se pudo observar que en algunos puntos la dispersión era ocasionada por errores al digitar la información, o al utilizar la plantilla con datos de años anteriores, lo que se evidencia por la heterogeneidad en la distribución anualmente; para corregir dichos errores se revisaron las bases de datos, se eliminaron los valores repetidos y/o anormales para la serie y fueron introducidos los valores correctos y/o las celdas se dejaron sin información.

En las Figuras 11 y 12 se pueden observar la media y la desviación estándar para la red de piezómetros del Sector Norte en el año 1996 y 2010. La media se encuentra representada por cada punto, mientras que la desviación es la barra o línea vertical; la cual dependiendo de su

longitud determina que tan disperso se encuentra el valor medido de la media. De igual forma, en la Figuras 13 y 14 se pueden observar la media y la desviación estándar para la red de piezómetros del Sector Cove en el año 1999 y 2010.

Se pudo concluir que las series analizadas sobre niveles piezométricos pueden ser promediadas y que además se pueden obtener los mapas de isopiezas, ya que anualmente su distribución es homogénea y la dispersión del dato medido y la media es pequeña.

6.2.3.4 Distribución anual de los niveles piezométricos

Ya que los pozos de observación o piezómetros son las captaciones por medio de las cuales se puede medir el nivel del agua y están conformadas por un tubo de pequeño diámetro conectado hidráulicamente al acuífero y en cuyo interior el agua alcanza una altura que equilibra la presión del acuífero en el punto de conexión, la observación de las variaciones del nivel piezométrico realizadas periódicamente por medio de las redes de monitoreo, proporcionan en términos generales información sobre la respuesta del acuífero a procesos de recarga o de extracción así como la tendencia del almacenamiento.²

² INTRUSION MARINA EN ACUIFEROS COSTEROS Y SU APLICACIÓN AL LITORAL ESPAÑOL. TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros (Granada, España). 1988

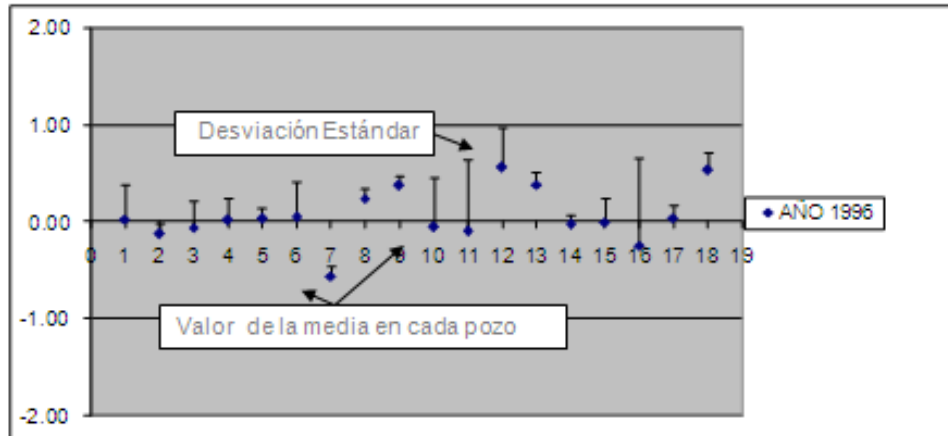


Figura 11 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 1996. Elaboración propia.

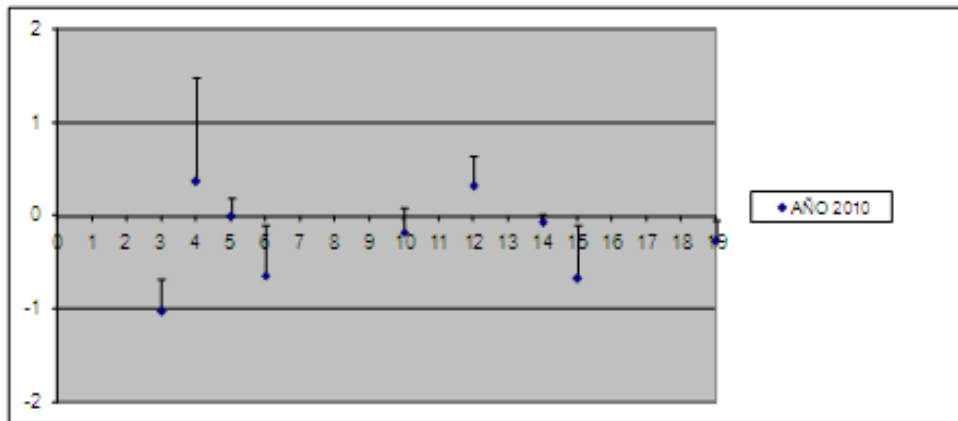


Figura 12 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Norte, 2010. Elaboración propia.

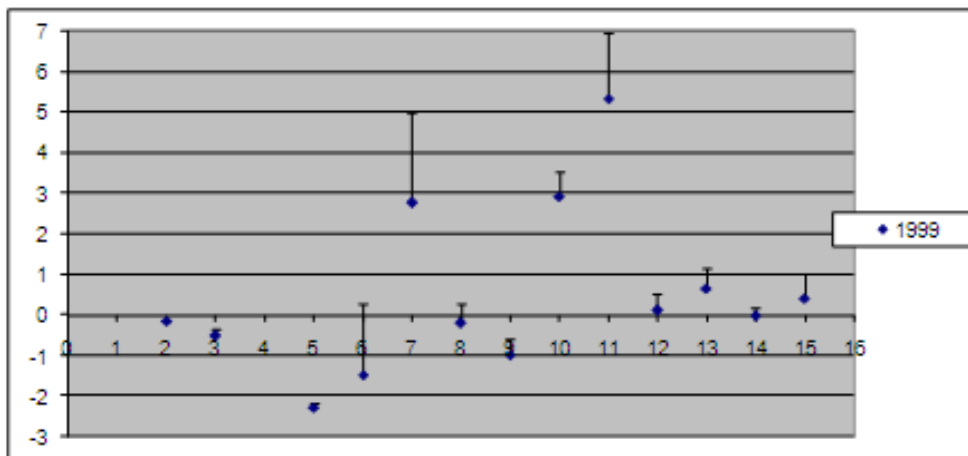


Figura 13 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 1999. Elaboración propia.

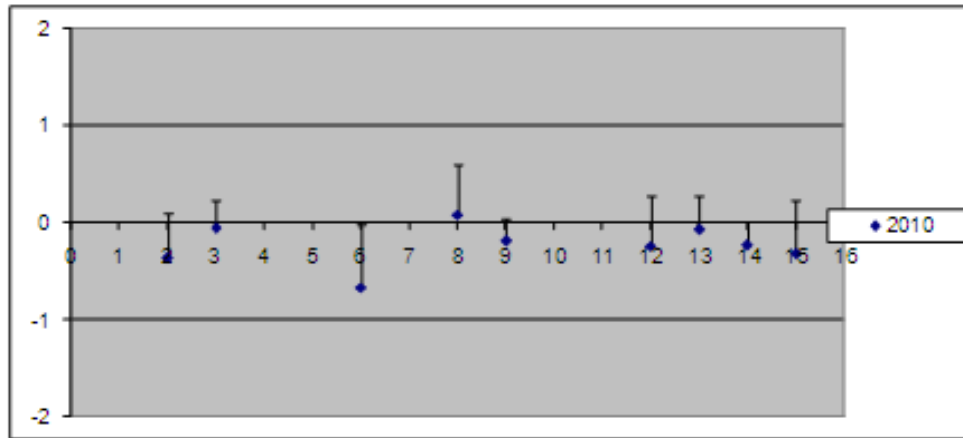


Figura 14 Distribución de la media y desviación estándar de niveles de la red Cove, 2010. Elaboración propia.

Específicamente para las áreas costeras y conformadas geológicamente por rocas karstificadas como es el caso de los acuíferos de San Andrés, la circulación de agua se da a favor de conductos o zonas de permeabilidad preferente ligadas a la disolución de los materiales a través de las discontinuidades del macizo rocoso (Fallas, diaclasas, cavernas). Esas discontinuidades condicionan un medio anisotrópico con diferentes respuestas según las porciones analizadas.

De otro lado, las variaciones de los niveles además de estar condicionadas por: la litología, las interacciones con el nivel base del mar, las mareas, fenómenos climáticos que pueden alterar el sistema de acuerdo con la variación del nivel, fenómenos de recarga o ausencia de ella y por las modificaciones antrópicas que están relacionadas con la extracción de agua subterránea en las zonas costeras, están condicionadas también por la ejecución de obras de ingeniería que

aumentan la escorrentía superficial y por lo tanto la salida del agua dulce directamente hacia el mar.

En este sentido, los promedios anuales para períodos secos y húmedos analizados en este documento, evidencian variaciones de los niveles piezométricos a lo largo del año, variaciones fundamentales para la selección de datos a utilizar en el procesamiento SIG. Estos promedios anuales para períodos secos y húmedos, se determinaron con base en los datos de las estaciones de lluvia, por medio de los cuales se construyeron los ciclos anuales de precipitación. Se generaron promedios anuales de la información piezométrica, conservando tanto los meses secos como los meses lluviosos.

6.2.3.5 Selección de serie de datos a utilizar para efectos del mapa de vulnerabilidad

Luego de realizar la revisión estadística de los datos históricos de niveles freático provenientes de la red piezométrica de la isla de San Andrés y de su agrupación de acuerdo a los periodos secos y húmedos del año, se procedió a seleccionar los años representativos para trabajar, durante los cuales los niveles freáticos presentaron valores críticos por debajo del nivel del mar.

Para tener una aproximación más precisa de los años críticos en donde los niveles freáticos presentaron profundizaciones anómalas, fue necesario comparar las series de datos piezométricos con los fenómenos de variabilidad climática ENSO (El Niño Southern Oscillation), mejor conocido en sus fases extremas como Niño (Fase cálida) y Niña (Fase fría).

Históricamente el territorio nacional ha sido afectado por el efecto climático de El Niño. En los últimos 30 años se han presentado eventos cálidos como los de 1991-1992 y 1997 y 1998, que generaron grandes impactos económicos como el apagón por racionamiento energético como consecuencia del déficit hídrico.

El Niño es el termino originalmente usado para describir la aparición de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas de lo normal en el pacifico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y Sur de Colombia. Este calentamiento de la superficie del Océano Pacifico cubre grandes extensiones y por su magnitud afecta el clima en diferentes regiones del planeta, dentro de las que se encuentra el norte de Suramérica donde está situado el territorio colombiano. (Tomado de posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia. 2012).

A continuación se presentan los episodios históricos de El Niño, según análisis realizado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration en posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia. 2012) (Ver tabla 12)

Tabla 12 Episodios históricos del El Niño. Fuente NOAA.

El Niño	Highest ONI (Índice Oceánico del Niño) Value
JJA 1951 –DJF 1951/52	1,2
DJF 1952/53 – JFM 1954	0,8

MAM 1957 – JJA 1958	1,8
OND 1958 – FMA 1959	0,6
MJJ 1963 –JFM 1964	1,4
AMJ 1965 – MAM 1966	1,9
JAS 1968 – DJF 1969/70	1,1
AMJ 1972 – FMA 1973	2,1
ASO 1976 – JFM 1977	0,8
ASO 1977 – JFM 1978	0,8
AMJ 1982 – MJJ 1983	2,2
JAS 1986 – JFM 1988	1,6
AMJ 1991 – MJJ 1992	1,6
ASO 1994 – FMA 1995	1,2
AMJ 1997 - MAM 1998	2,4
AMJ 2002 – JFM 2003	1,3
JJA 2004 – DJF 2004/05	0,7
ASO 2006 – DJF 2006/07	1,0
JJA 2009 – MAM 2010	1,6

De acuerdo a la tabla anterior y a la serie de datos de piezometría disponible, los años con mayor índice ONI corresponden a 1997 (Abril a junio) – 1998 (Marzo a Mayo), 2002 (abril a junio) – 2003 (enero a marzo) y 2009 (junio a agosto) – 2010 (marzo a mayo).

Debido a que los períodos Niño seleccionados tuvieron efectos no solo sobre un año sino en diversos meses en dos años, es necesario utilizar la información de piezometría invierno – verano según corresponda al periodo evaluado. En este sentido la información a utilizar corresponde a los períodos mostrados en la tabla 13.

Tabla 13 Periodos piezométricos a utilizar

Periodo Niño	Periodo piezometría a utilizar
AMJ 1997 - MAM 1998	Invierno 1997 – verano 1998
AMJ 2002 – JFM 2003	Invierno 2002 – verano 2003
JJA 2009 – MAM 2010	Invierno 2009 – verano 2010

6.2.3.6 Generación de superficies piezométricas de series de datos Niño y selección del método de interpolación

Las superficies piezométricas corresponden a un espacio geométrico que contiene puntos que marcan alturas piezométricas de cada parte de un acuífero con respecto a su profundidad; se representan mediante líneas de igual altura piezométrica llamadas isopiezas. La profundidad del nivel piezométrico se mide desde una determinada referencia, para la cual es necesario conocer su cota respecto a un punto fijo como lo es el nivel del mar.

Las curvas de isopiezas se generan de datos puntuales recolectados con la medición en campo de la profundidad de los niveles freáticos, para un determinado tiempo y los métodos analíticos que se utilizan para obtenerlas, son los mismos que se emplean en topografía. Para este caso específico, corresponden a los años Niño 1997-1998, 2002-2003 y 2009 -2010. Las curvas se

trazan teniendo en cuenta las curvas de nivel y la altura sobre el nivel del mar de los piezómetros monitoreados.

Para efectos de realizar el análisis de las redes en la isla de San Andrés, se obtuvieron los mapas de isopiezas de los niveles freáticos por medio del software ARGIS el cual ofrece diversas herramientas de interpolación por medio de las cuales se pueden construir las líneas de isovalores entre pozos.

Se realizó una comparación de los valores obtenidos – superficies – por dos diferentes métodos de interpolación de datos puntuales para la generación del mapa de isovalores de profundidad. Los métodos evaluados fueron IDW y Kriging Simple y Kriging Ordinario. Inicialmente se realizó un análisis de los métodos IDW y Kriging Simple, con los valores por defecto del modelo de predicción.

Para efectos de realizar la comparación de los resultados arrojados por ambos métodos se utilizó la herramienta Geostatistical Analyst. En primera instancia, se tomó una muestra del año 2010 y se interpoló por el método de Kriging simple, y IDW, obteniéndose los mapas de predicción que se presentan en las figuras 15 y 16.

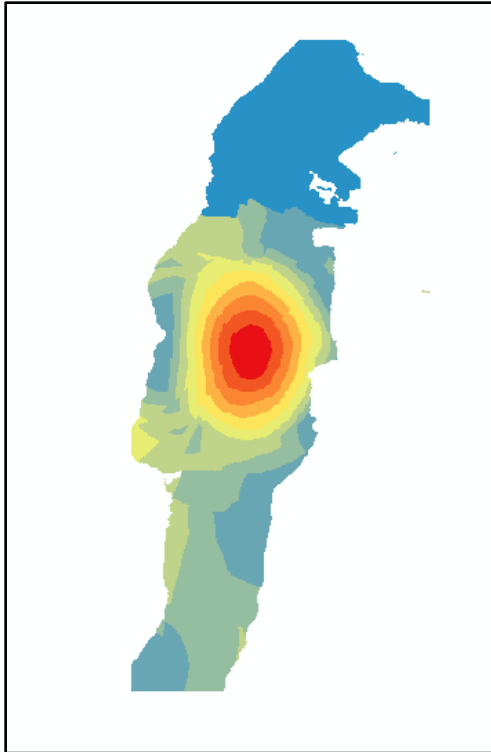


Figura 15 Mapa Método Kriging Simple

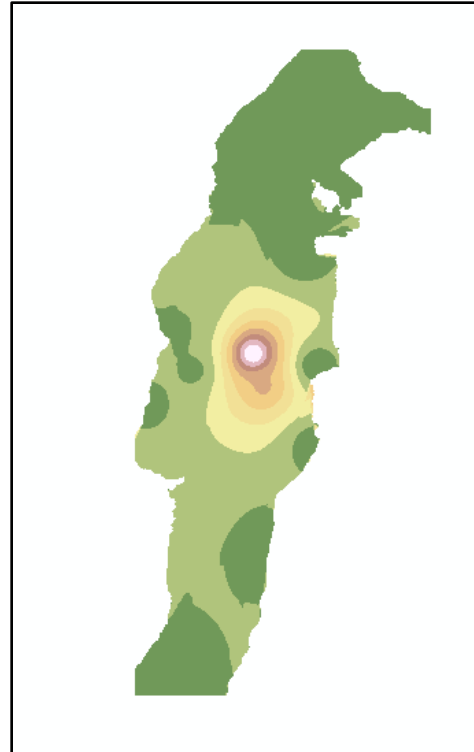


Figura 16 Mapa Método IDW

En cuanto a la comparación visual realizada entre los dos métodos, se pudo observar que el método IDW tiende a producir patrones poco reales conocidos como tipo “ojo de buey” alrededor de los puntos muestreados. Lo anterior expresa el peso que se le puede dar a la variación particular del valor de un punto de muestreo sobre los que están alrededor (Gotway 1996 en Villatoro et al, 2008).

La interpolación de los datos con el método de Kriging fue menos brusca que con el IDW, debido a que en este se cuantifica la estructura espacial de los datos -mediante el uso de variogramas llamados algunas veces semivariogramas debido a su similitud en el cálculo- y los predice mediante la interpolación, usando estadística. Se asume que los datos más cercanos a un

punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés (Villatoro et al, 2008). Relacionado con los mapas de predicción, el método Kriging se comportó mejor, adicionalmente la interpolación realizada con este método es mucho más real respecto a los valores encontrados en campo.

Por otro lado, se analizaron ambos métodos teniendo en cuenta los resultados del análisis de validación cruzada obtenido por la herramienta Geostatistical Analyst, en donde se obtuvo que el Mean más cercano al 0 fue el del método de Kriging simple en comparación con el IDW; sin embargo, el IDW presenta un menor RMS en comparación con el Kriging Simple (Ver figura 17). La curva QQplot arrojada por el kriging, evidencia que la distribución de los datos no es normal respecto a la estándar, debido a que los datos se separan de la curva estándar en muchos segmentos de los registros graficados (Ver figura 18)

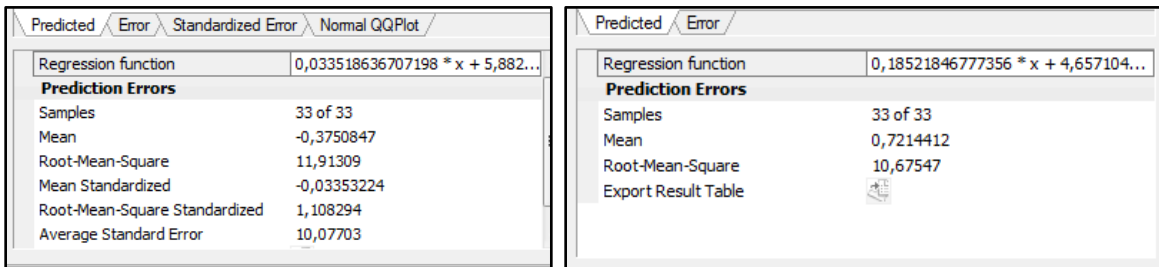


Figura 17 Validación cruzada entre Kriging simple e IDW

Se procedió entonces a realizar la comparación de los resultados obtenidos con el Kriging simple con el método de interpolación Kriging Ordinario, sin ningún procesamiento previo (Ver Figura 19). Los resultados arrojados indican que el parámetro Mean incrementó respecto al kriging simple; sin embargo, datos de Root Mean Square y Average Standard Error, presentaron valores

inferiores. Adicionalmente, la curva QQplot del Kriging Ordinario se ajustó mejor a la curva estándar en comparación con el kriging simple.

En cuanto a las salidas graficas de dichos métodos (Ver Figura 20.a, b), se observa que el kriging ordinario representa mejor la superficie piezométrica respecto a la superficie modelada con el kriging simple. Para efectos de verificar si la superficie interpolada con el kriging ordinario presenta algún grado de tendencia, se realizó el análisis de los datos con Geostatistical Analyst.

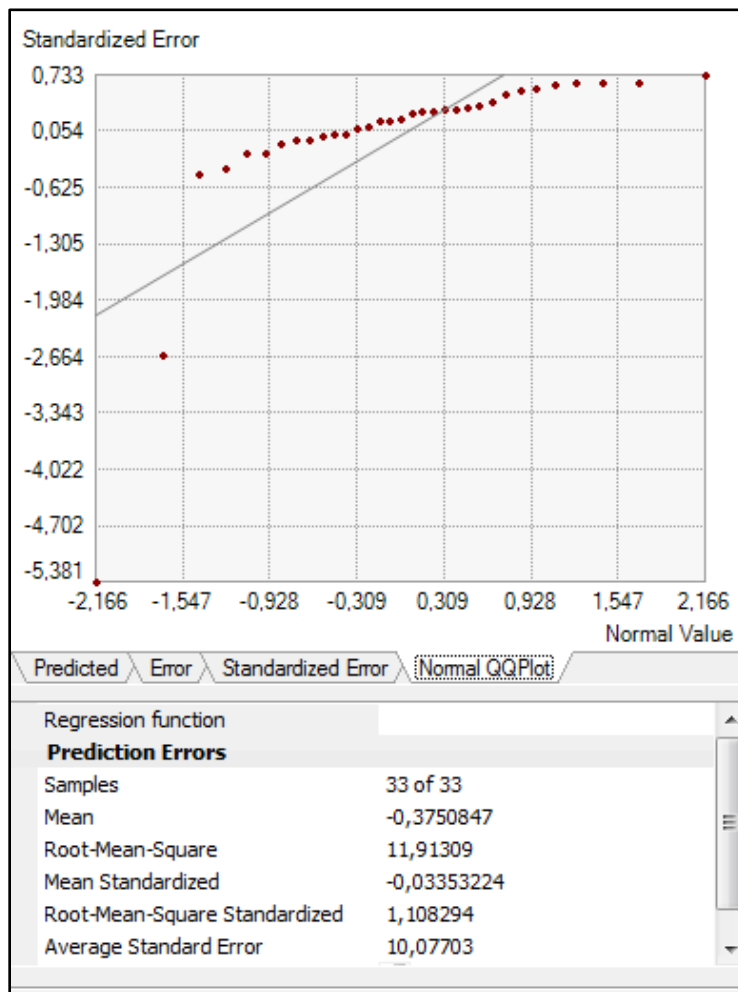


Figura 18 Curva QQplot del método Kriging Simple

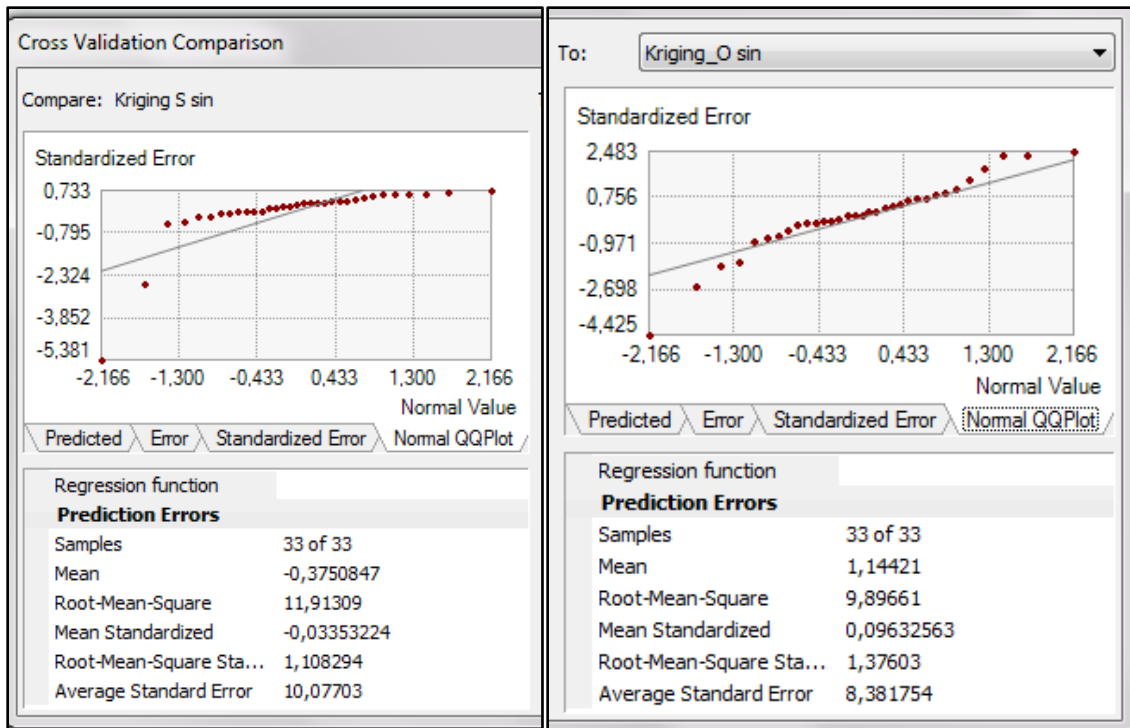


Figura 19 Validación cruzada entre Kriging Simple y Ordinario

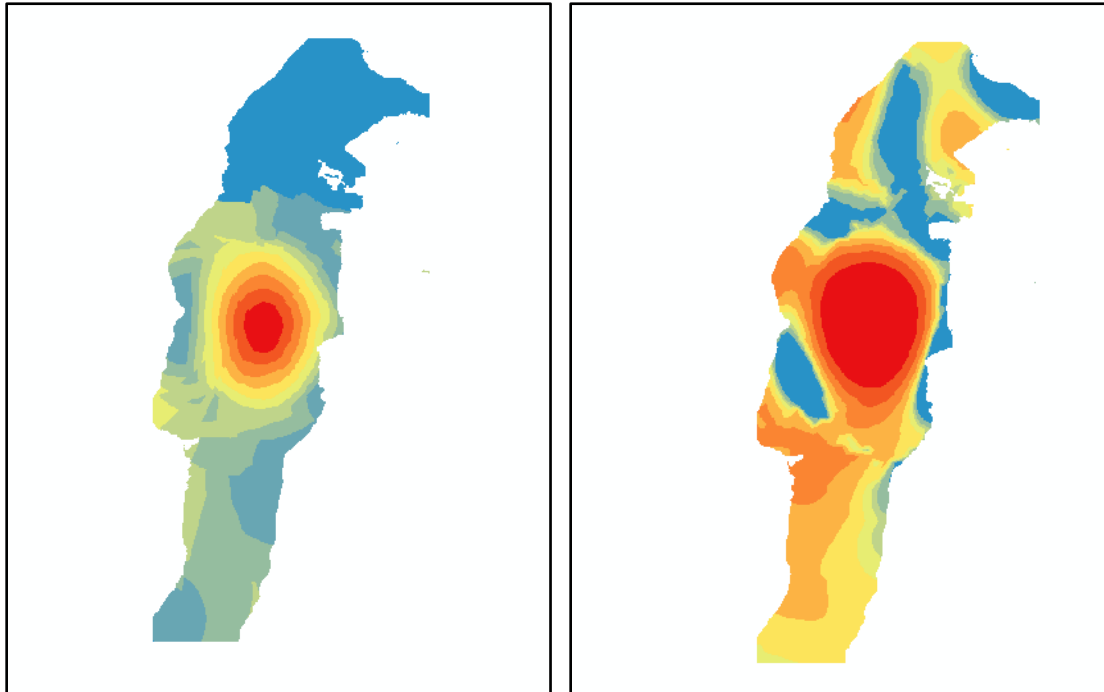


Figura 20 a) Mapa Método Kriging simple b) Mapa Método Kriging Ordinario.

En cuanto a la distribución observada en el histograma (ver figura 21), esta muestra que es de tipo unimodal y asimétrica, tanto Mean como Median difieren en valor, por lo cual se interpreta que el histograma es de tipo no normal y se requeriría preliminarmente una transformación para convertirla en normal, para que la superficie generada arroje mejores datos.

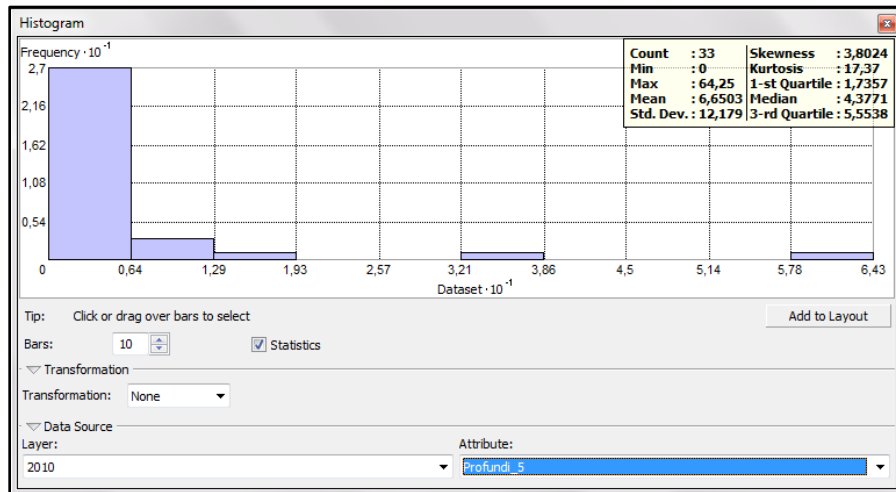


Figura 21 Histograma Kriging Ordinario

En cuanto a la curva Normal QQplot (Figura 22), esta indica que la distribución de los puntos no están cerca a la curva de distribución estándar normal, por lo cual nuevamente hay indicios que se debe utilizar algún tipo de transformación de los datos para obtener una distribución normal antes de utilizar las técnicas de interpolación. Para verificar lo anterior, se realizó un análisis de tendencias (Figura 23), en el cual se observó que los datos se ven representados por un lado con una línea verde curva en forma de U, exhibiendo una tendencia mediana en dirección este oeste y por el otro con una línea curva color azul en forma de U, exhibiendo una tendencia menos predominante en sentido norte sur.

En este caso, debido a que hay una clara tendencia en forma de U, una buena opción para la tendencia local estaría representada en un segundo orden polinomial. La tendencia es NE-SW y posiblemente está relacionada con que la distribución de los puntos monitoreados obedece espacialmente a que la orientación de la superficie en dicho eje es mayor que en el eje contrario, por otro lado podría estar también relacionada con la variación topográfica.

Por otro lado analizando la opción Semivariogram/Covariance Cloud (Figura 24), se determinó en cuanto a la autocorrelación espacial entre las muestras medidas, que los valores con semivariogramas altos corresponden a los valores de pares de datos que comparan zonas planas con zonas altas; por lo tanto hay grandes diferencias entre estos conjuntos. Se considera en este caso que hay influencia direccional dada por la topografía.

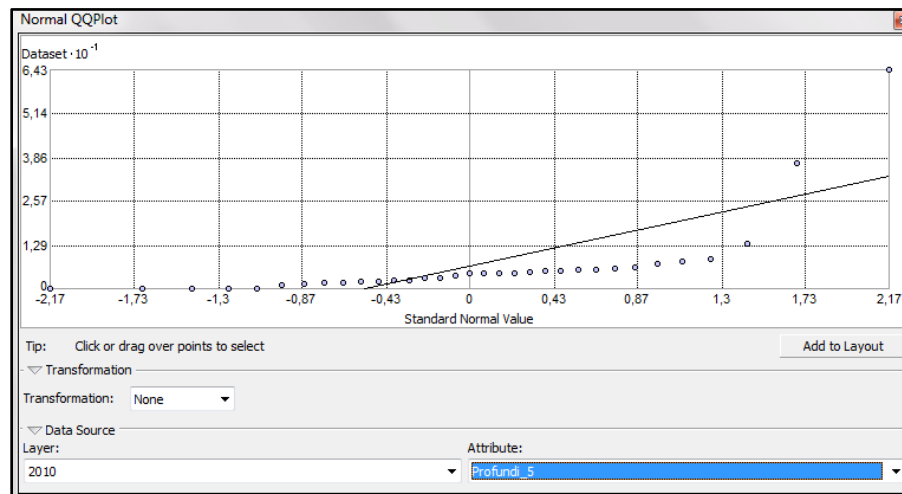


Figura 22 Curva Normal QQplot Kriging Ordinario

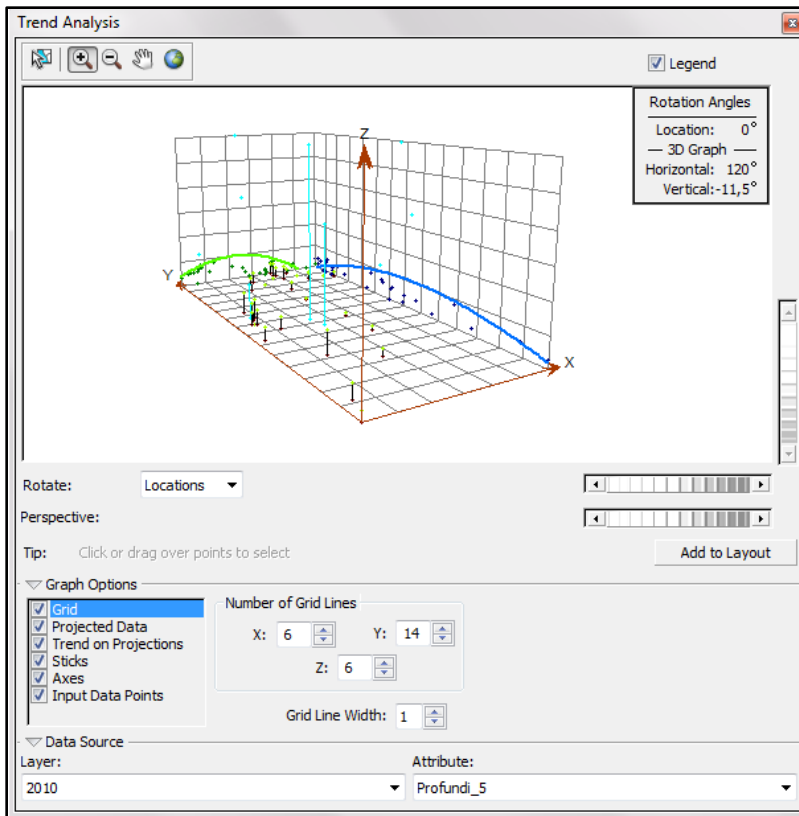


Figura 23 Análisis de tendencias Kriging Ordinario

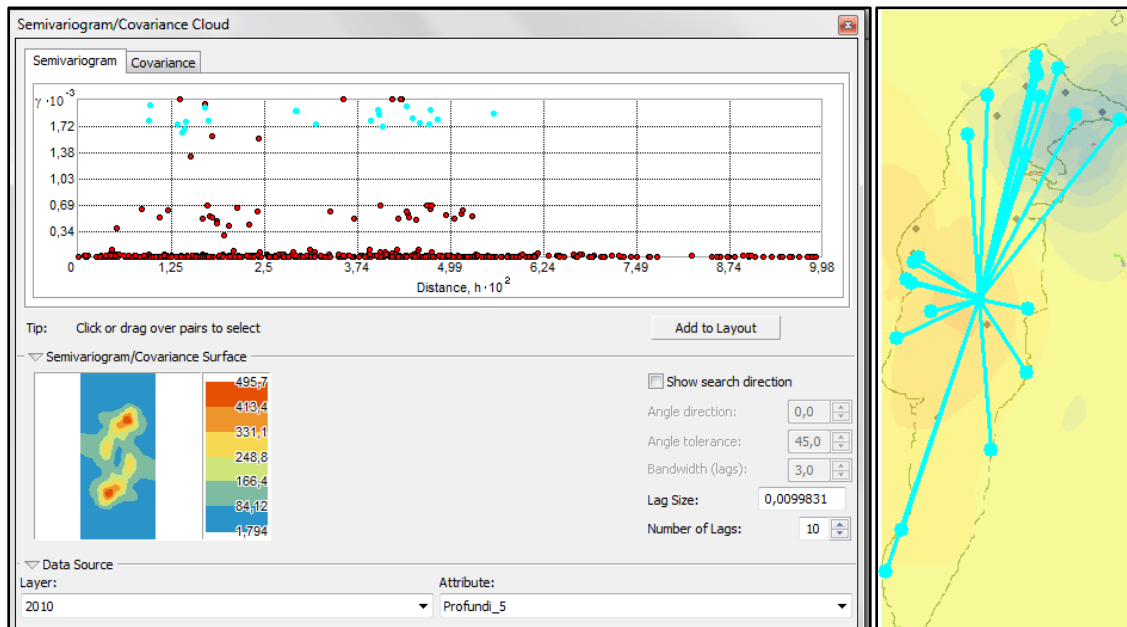


Figura 24 Semivariograma y Nube de covarianza

Se procedió entonces a implementar el método de kriging ordinario realizando la incorporación de la tendencia al proceso de interpolación, para lo cual se utilizó nuevamente la herramienta Geostatistical Wizard, seleccionado el método de interpolación Kriging Ordinario, seleccionado en la casilla de Order of trend removal, el segundo orden polinomial, la cual indica que los cambios más rápidos se dan la dirección NW-SE debido a que la isla tiene una forma achatada en esta dirección y más corta en comparación con el otro eje y los cambios graduales se dan NE-SW debido a que es un eje más largo en términos territoriales (Figura 25). Para efectos de corroborar la influencia direccional se generaron los semivariogramas con el modelamiento, lo cual indicó nuevamente que la dirección del eje mayor hacia el NE-SW (Figura 26)

Finalmente, se utilizó la opción Cross Validation para saber qué tan bueno puede ser el modelo en la medida que los puntos se ajusten a la línea estándar. Las predicciones de este modelo en comparación con los anteriormente analizados son mejores en algunos de los parámetros de predicción. El kriging Ordinario procesado en comparación con el no procesado presenta parámetros menores tales como Mean, Mean Standardized, Root Mean Square y Average Estándar Error (figura 27).

En cuanto a las superficies de interpolación generadas con ambos métodos, el Kriging Ordinario con procesamiento ofrece mejor salida gráfica y con mayor aproximación a las superficies piezométricas de los acuíferos (figuras 28 y 29).

En esta medida, se seleccionó finalmente este modelo de predicción para generar las superficies piezométricas interpoladas y propiciar un mejor desarrollo del cálculo de vulnerabilidad (figuras 30 a 35).

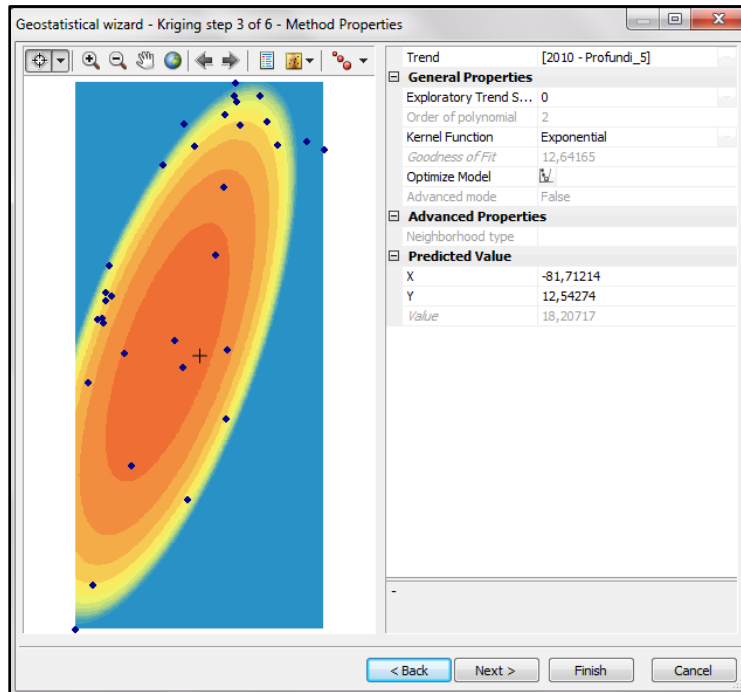


Figura 25 Trend removal

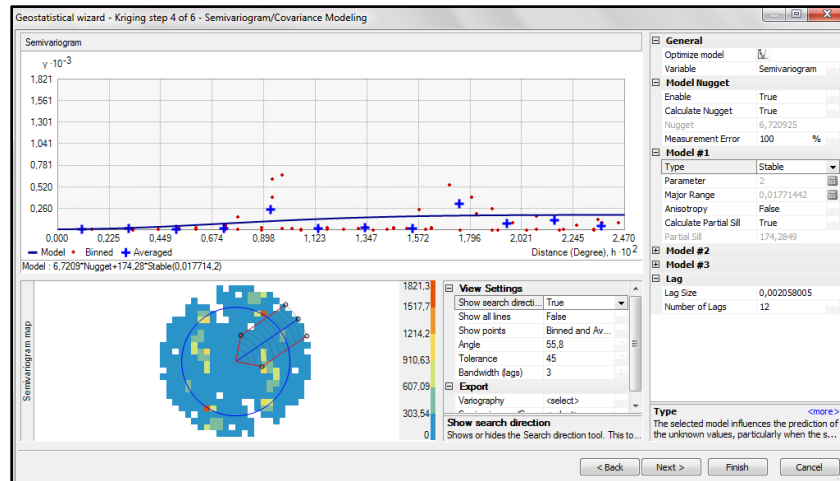


Figura 26 Semivariogram7Covariance Modeling

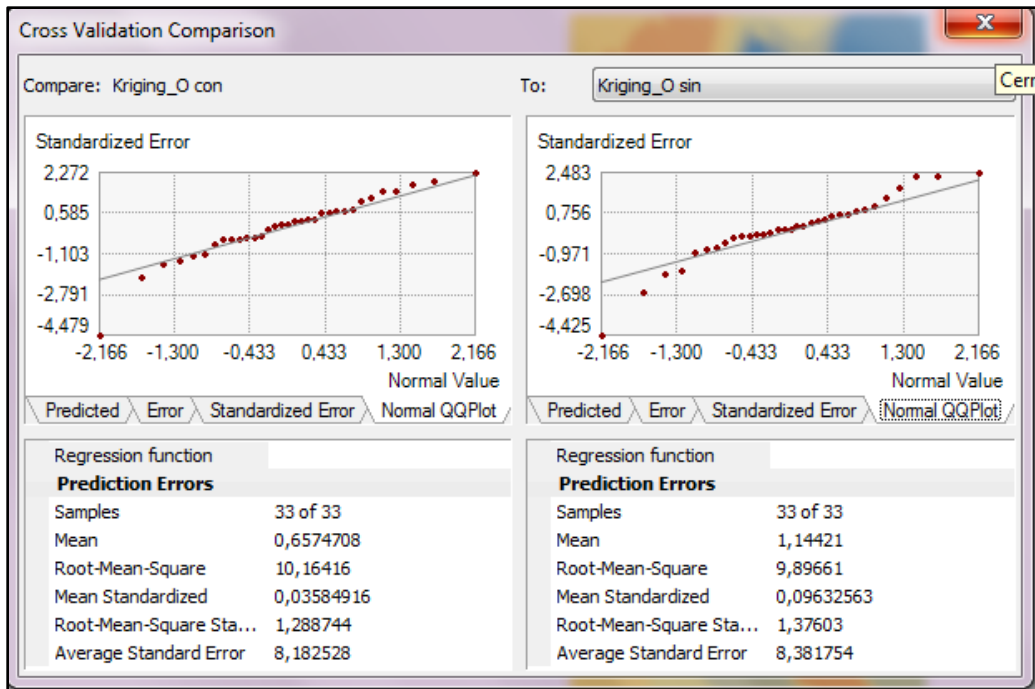


Figura 27 Cross Validation Kriging Ordinario con y sin trend

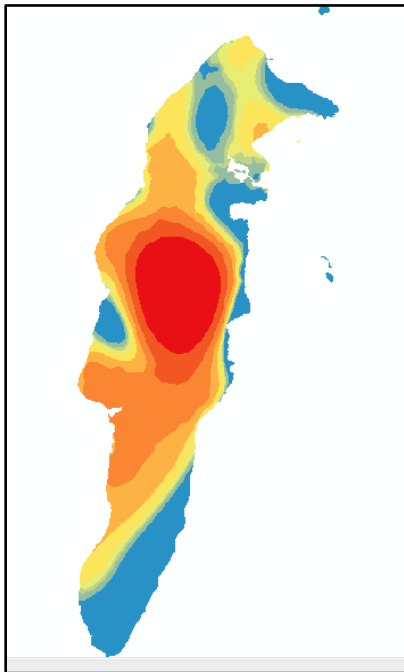


Figura 28 Mapa Kriging Ordinario sin procesamiento.

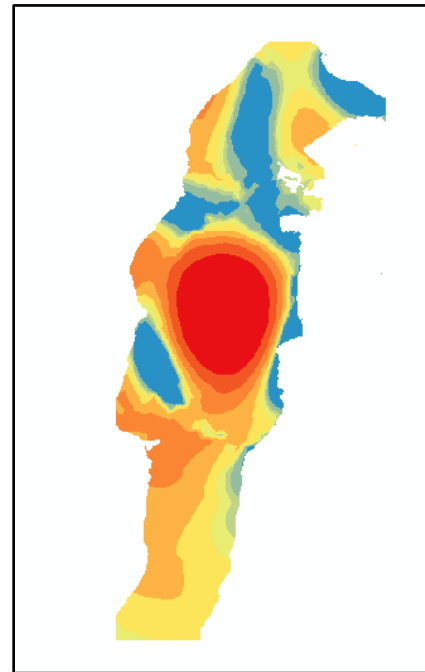


Figura 29 Mapa Kriging Ordinario con procesamiento.

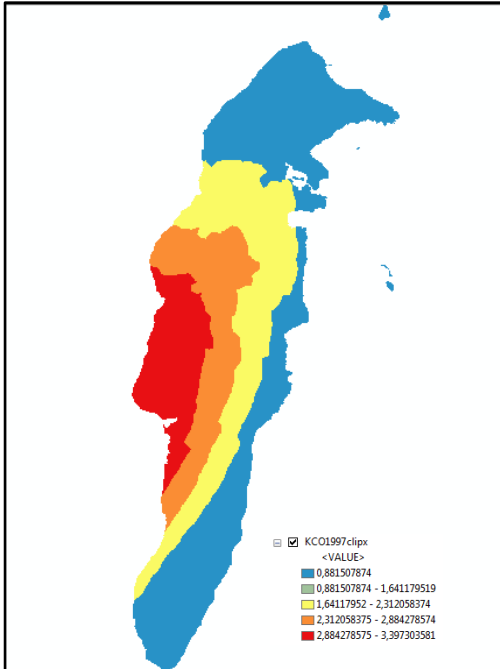


Figura 30 Mapa de piezometría 1997

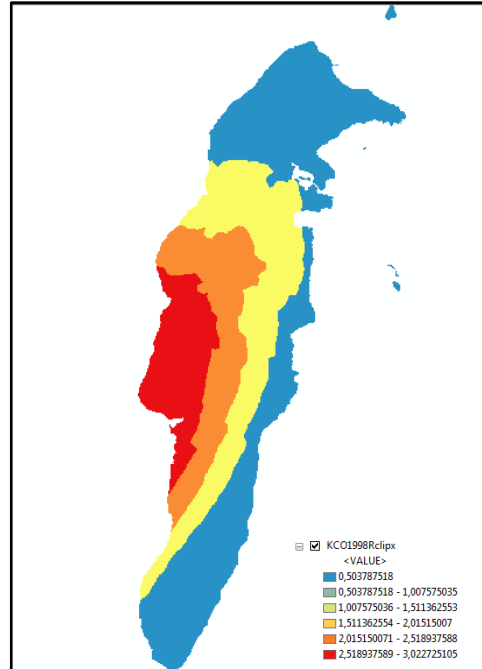


Figura 31 Mapa de piezometría 1998

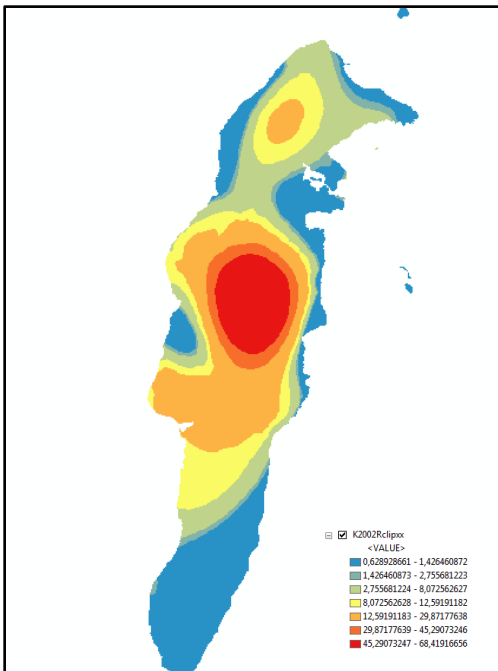


Figura 32 Mapa de piezometría 2002

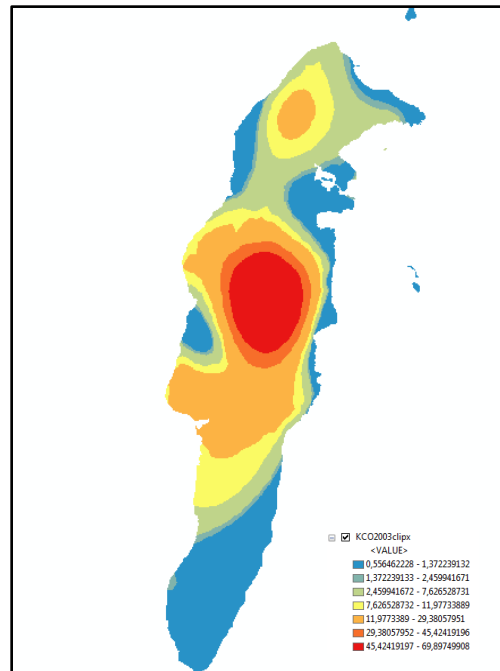


Figura 33 Mapa de piezometría 2003

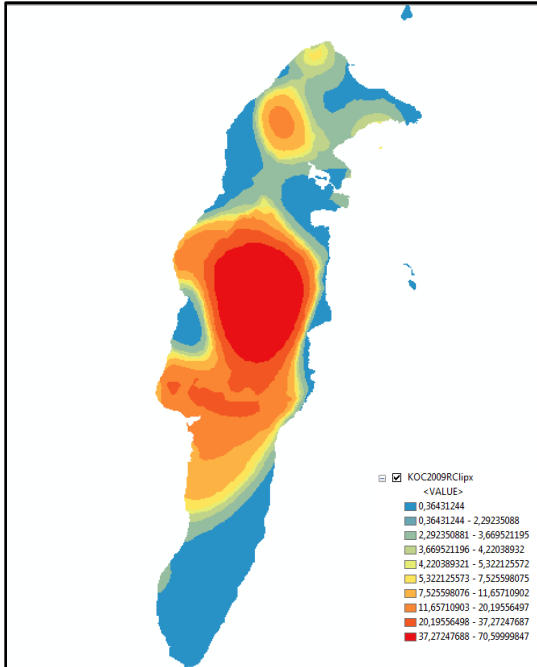


Figura 34 Mapa de piezometría 2009

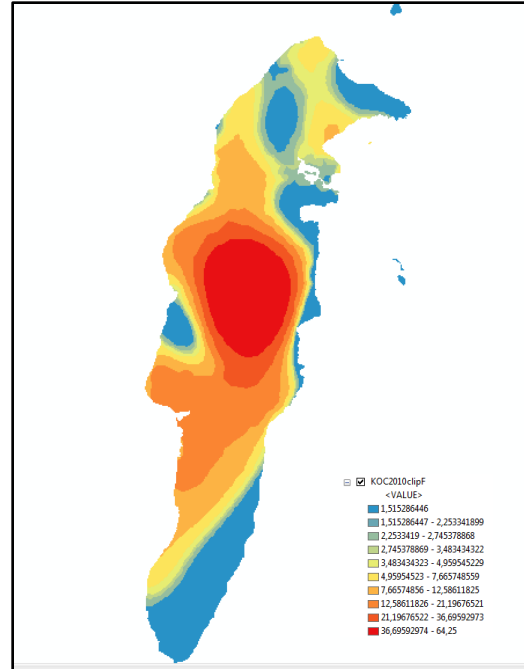


Figura 35 Mapa de piezometría 2010

Luego de la generación de la superficie piezométrica, se procedió a reclasificar los mapas generados para unificar los mapas de acuerdo a los parámetros que establece la metodología GOD para niveles piezométricos. Para ello, se utilizó la herramienta Spatial Analyst / Reclassify, en donde se introdujo la nueva valoración para cada uno de los rangos que aparecen (según datos de la Figura 36) y el mapa de valoración de la profundidad del nivel freático del acuífero (ver Figuras 37 a 42).

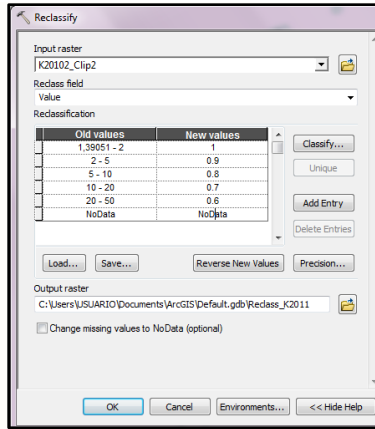


Figura 36 Reclasificación según parámetros GOD

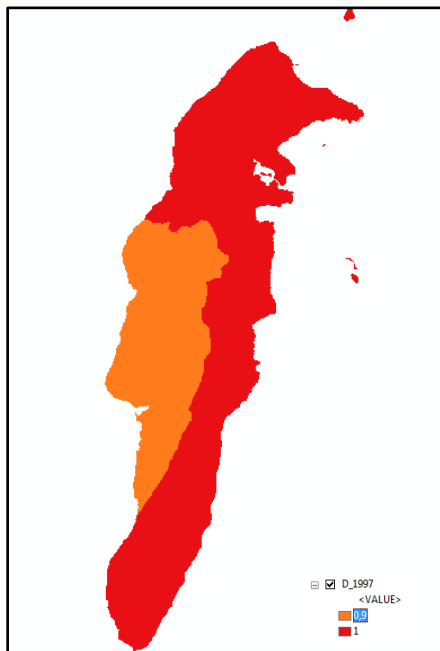


Figura 37 Mapa de piezometría reclasificado 1997

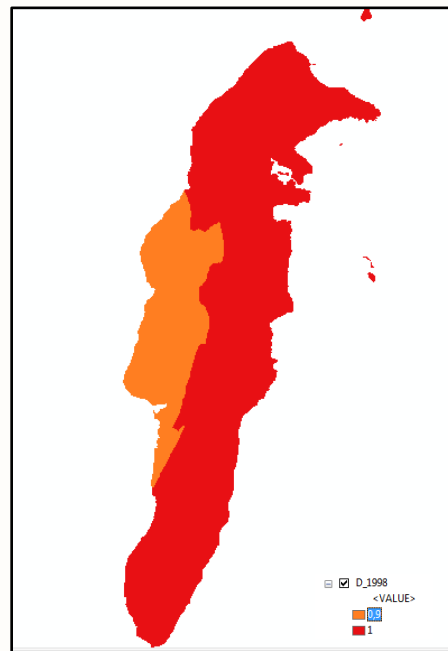


Figura 38 Mapa de piezometría reclasificado 1998

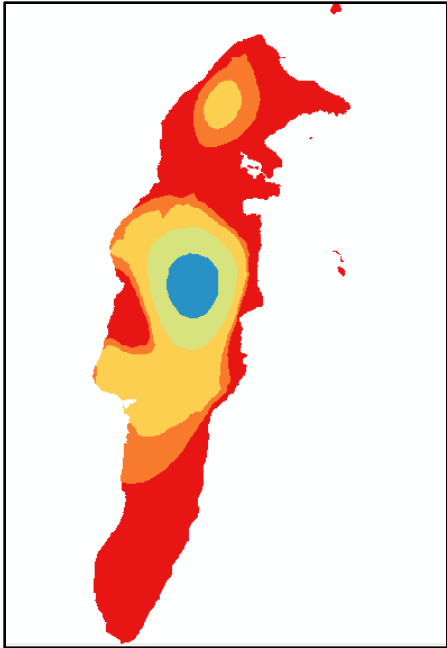


Figura 39 Mapa de piezometría reclasificado 2002

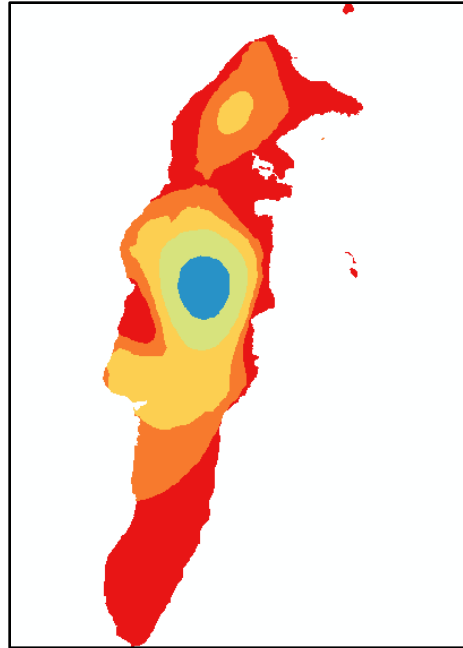


Figura 40 Mapa de piezometría reclasificado 2003

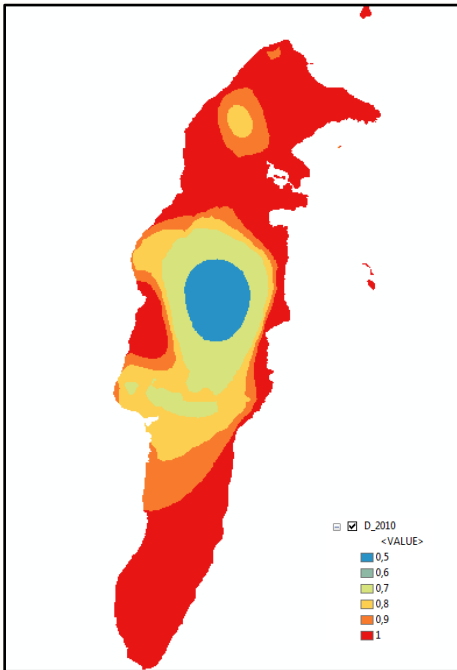


Figura 41 Mapa de piezometría reclasificado 2009

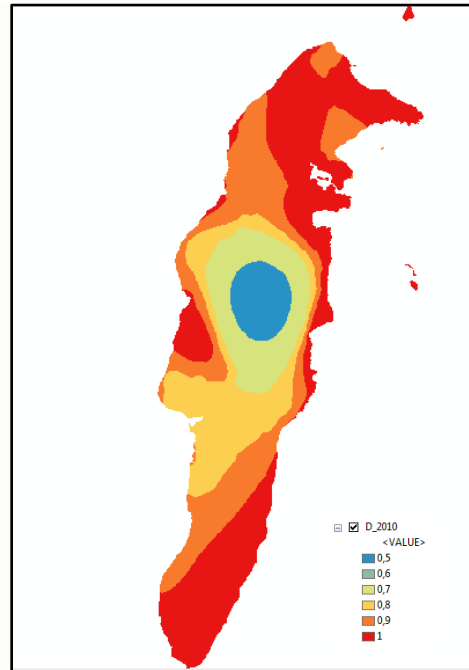


Figura 42 Mapa de piezometría reclasificado 2010

6.3 MAPA DE VULNERABILIDAD

Luego de generar los mapas correspondientes a Ground Water Occurece (G), Overall Lithology (O) y Depth to Groundwater (D) y sus respectivas reclasificaciones a los parámetros datos por la metodología GOD (ver figuras 43 y 44), se procedió a realizar el álgebra de mapas que arrojó el mapa final de vulnerabilidad a la contaminación, partiendo de la siguiente ecuación:

$$\text{VULENRABILIDAD} = G \times O \times D \quad (4)$$

Para ello se utilizó la herramienta Spatial Analyst/Raster Calculator, obteniéndose los mapas ilustrados en las figuras 45 a 50.

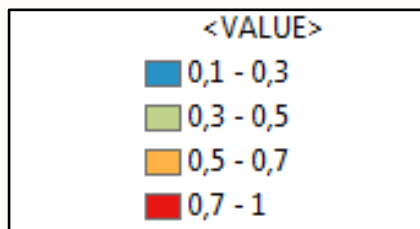


Figura 43 Ponderación numérica GOD

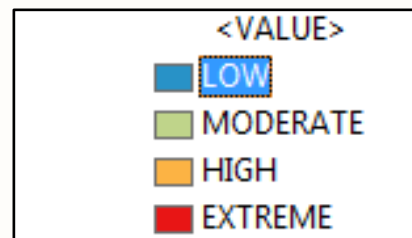


Figura 44 Ponderación cualitativa GOD

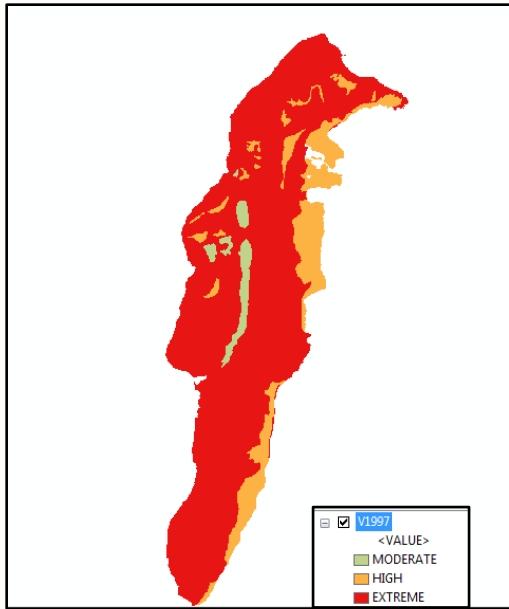


Figura 45 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1997

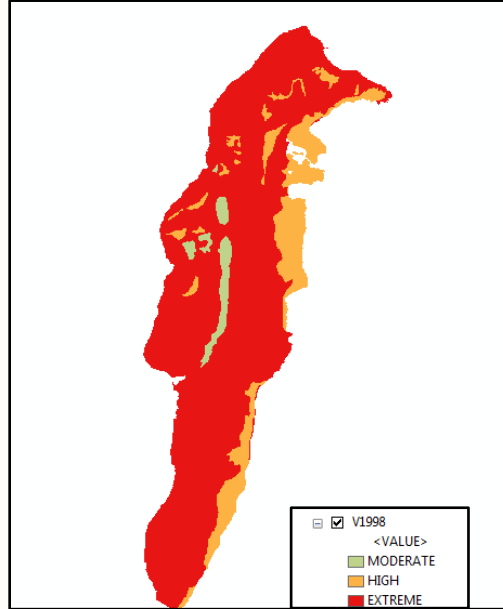


Figura 46 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 1998

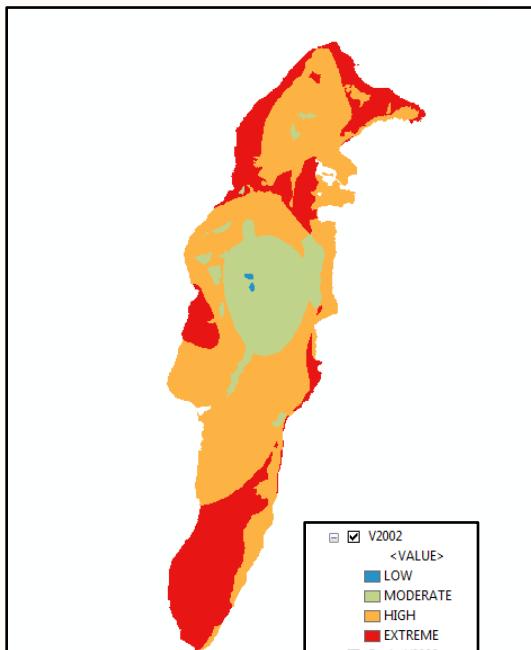


Figura 47 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2002

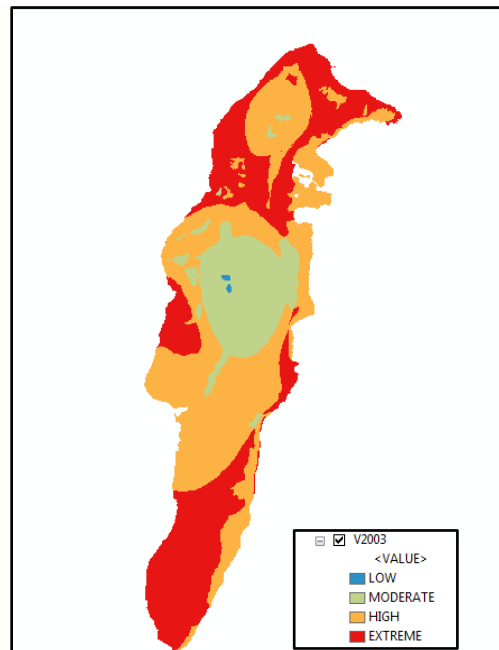


Figura 48 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2003

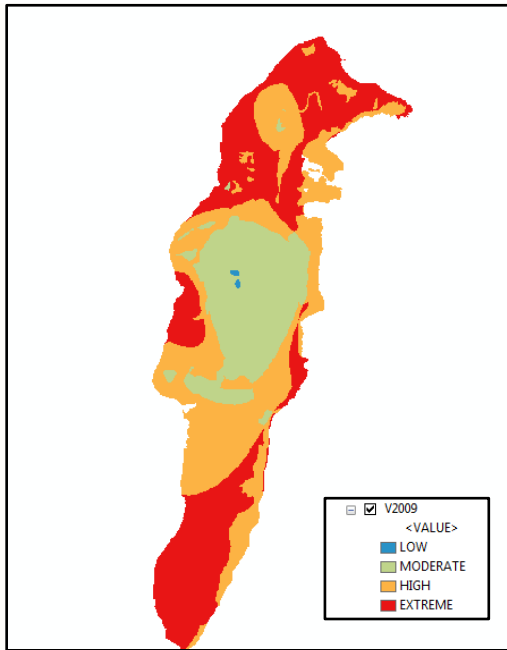


Figura 49 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2009

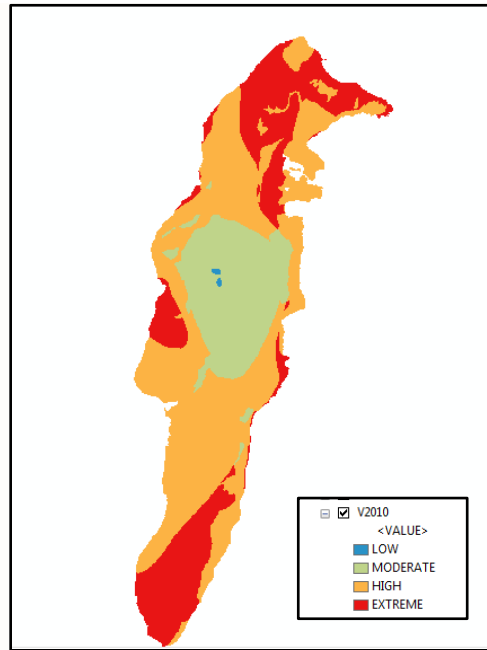


Figura 50 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación 2010

En cuanto a los resultados obtenidos con el álgebra de mapas, se observa que luego de realizar la reclasificación de los datos, es mucho más fácil hacer el análisis espacio temporal de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en la isla de San Andrés. Los mapas de vulnerabilidad de los años 1997 y 1998 no presentaron variaciones aunque representaban dos períodos diferentes para un mismo año Niño.

Los mapas de vulnerabilidad de los años 2002 y 2003, evidencian variaciones en cuanto a que las áreas de vulnerabilidad extrema, ya que son mayores para el año 2003 que para 2002, y se encuentran relacionadas posiblemente con procesos de recarga en el acuífero San Luis, que posibilita mayor cercanía de la superficie freática a la superficie.

Los mapas de vulnerabilidad de los años 2009 y 2010, evidencian variaciones en cuanto a las áreas de vulnerabilidad extrema, ya que disminuyen en 2010 en comparación con el año 2009 y en el caso de la vulnerabilidad moderada generada en 2009, en algunos casos pasa a vulnerabilidad Alta para 2010. Se observa también que en 2010 incrementan las áreas de vulnerabilidad alta y disminuyen las áreas de vulnerabilidad extrema.

Realizando un comparativo entre los tres períodos seleccionados, es evidente que las áreas de vulnerabilidad extrema disminuyen considerablemente desde 1997 hasta 2010, lo cual es debido a la variación en profundidad de los niveles freáticos y a su profundización a lo largo de los años, lo cual hace que sean de menos accesibilidad a los contaminantes. Sin embargo, esta situación trae consigo otro tipo de interpretaciones, como la posibilidad de la disminución en la recarga de

los acuíferos, lo cual hace que la tabla de agua se encuentre más profunda con los años, posibilitando un desabastecimiento en cierta medida.

6.4 DETERMINACION DEL RIESGO

Para efectos del presente trabajo se implementará la valoración del índice de intensidad del riesgo (RII) indicada por Hötzl et al (2004) en el marco de la Acción COST 620, para la generación del mapa del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Este método forma parte del modelo tipo “Origen-Pathway-Target”, donde la contaminación de la misma (target) se evalúa a partir de las fuentes potenciales de peligro (origen) y vulnerabilidad del acuífero (pathway) (Daly et al, 2002 en Jiménez et al, 2010).

Este índice se obtuvo a partir del cociente entre el índice de vulnerabilidad obtenida (PI) y el índice de peligrosidad (HI) definido en el apartado anterior:

$$RII = (1 / HI) \cdot PI \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que en este trabajo se modeló la vulnerabilidad por medio de la metodología GOD, debido a que éste fue el primer método utilizado en la primera aproximación de vulnerabilidad realizada para la isla de San Andrés y que el método COP propuesto por Acción COST 620, para acuíferos kársticos no pudo ser utilizado por ausencia de información requerida para el mismo, se procedió a calcular el Riego de la siguiente manera:

$$RII = (1 / HI) \cdot GOD \quad (6)$$

Las diferentes cartografías temáticas se obtuvieron a partir de la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para la puntuación, superposición de capas así como su tratamiento conjunto se utilizaron herramientas de análisis espacial del software ArcGis (Figura 51)

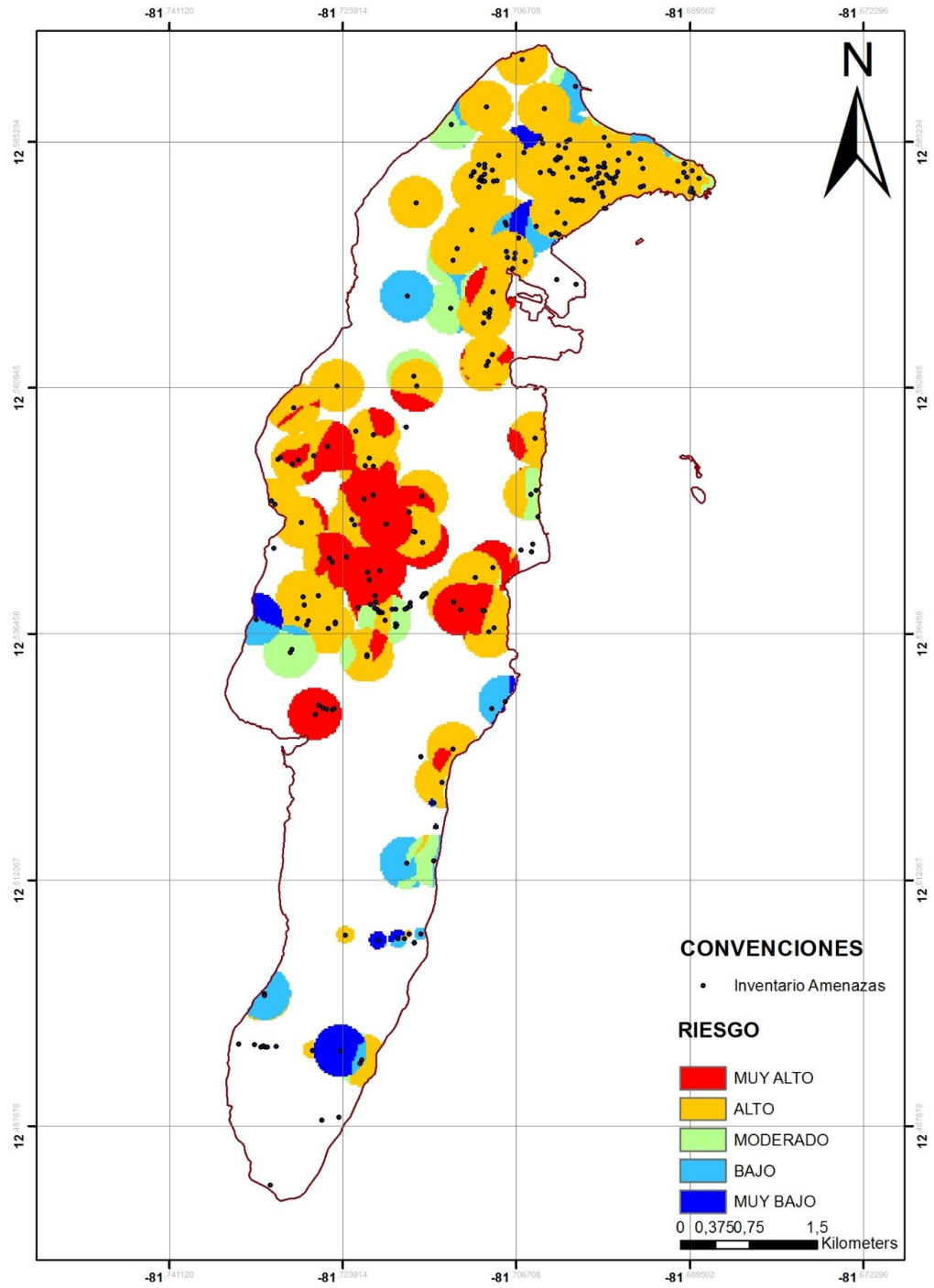


Figura 51 Mapa de Riesgo por contaminación. Elaboración propia.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez aplicadas las herramientas cartográficas disponibles con el software utilizado, de su validación, de haber removido los posibles trends de la información geográfica, de la aplicación final de un modelo lo más cercano a la realidad piezométrica de los kárst en la isla de San Andrés, y de la implementación de metodologías recomendadas para acuíferos kársticos por la Acción Europea COST 620 para la evaluación de la amenaza y riesgo de contaminación hacia las aguas subterráneas y la metodología GOD para el cálculo de la vulnerabilidad, se logró obtener un producto final denominado mapa de riesgos por contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, en el que se logró espacializar de forma categorizada el riesgo a la contaminación de los acuíferos en la Isla y se logró determinar las aéreas de afectación o perímetros, por medio de una formulación basada en aspectos hidrogeológicos, naturaleza de los puntos de contaminación, el uso del suelo correspondiente y la influencia de otros puntos críticos aledaños.

Con todo este proceso de espacialización de variables complejas en karst, es posible evidenciar zonas que requieren de la aplicación a corto y mediano plazo de estrategias de protección, toda vez que corresponden a zonas muy vulnerables a las amenazas identificadas y que arrojan un riesgo igualmente alto.

Se puede observar en el territorio zonas de muy alto riesgo concentradas principalmente en la parte central de la isla (En sentido Sur - Norte, desde Lions Hill incluyendo la Cuenca del Cove y la ensenada del Cove hasta Court House y en sentido Este - Oeste desde el Barack hasta Linval), en donde si bien los niveles freáticos tienen mayor profundidad, se determinó la presencia de agentes amenazantes con alto potencial de contaminación, que le imprimen un alto riesgo a esta área, relacionados principalmente con la presencia de zonas de disposición de residuos, presencia de cementerios y red de pozos profundos sin un perímetro de protección definido.

Es precisamente esta área la que hace parte de la zona de recarga del acuífero San Andrés, zona que corresponde al principal mecanismo de alimentación del acuífero de mayor importancia en la isla, de donde se extrae el agua para consumo humano suministrada y transportada por la empresa prestadora de servicios.

En este sentido es importante encender las alarmas respecto a los aspectos que determinaron los resultados aquí presentados, los cuales están relacionados con la localización de actividades contaminantes en lo que se denomina la Zona Núcleo de la Cuenca del Cove específicamente en las Áreas de Protección y Zona de Amortiguamiento, alrededor de las cuales los controles de disposición de residuos sólidos o líquidos deben ser más estrictos, ya que se encuentran regulados por medio del Plan de Manejo de la Cuenca del Cove, que en cuanto a prohibiciones, estipula que no se permiten entre otras la agricultura donde se realice tala, quema, descapote, siembra limpia y monocultivos, construcción de nuevos cementerios familiares y públicos, utilización de cementerios familiares existentes en la zona.

Otros sectores identificados con muy alto riesgo de contaminación corresponden al de Harmony Hall Hill, producto de la coexistencia de pozos con niveles freáticos superficiales y cementerios y la ensenada de El Cove, en donde además de niveles freáticos superficiales, la presencia de diversos focos de contaminación.

Las zonas con riesgo alto de contaminación se localizaron principalmente alrededor de la zona de muy alto riesgo y hacia el norte de la isla, situación acorde con características como alta población concentrada en esta área, niveles freáticos superficiales, fenómenos amenazantes relacionados con la gran densidad de captaciones de agua subterránea domesticas sin protección, mayor densificación de pozos sépticos y pozos costeros que se comportan como conductos directos para el ingreso de contaminación hacia los acuíferos, presencia de cementerios y puntos de concentración de residuos líquidos y sólidos entre otros que contribuyen a un riesgo alto más densificado en el territorio.

Las áreas que presentan riesgo moderado se representaron de forma localizada en sectores tales como Pusey Hill y Clay Mount en la zona central de la isla, Vía San Luis a la altura de Four Corner, Sector del Bay y Backers Hill hasta Bruns Bank y en algunos sectores de la Vía Circunvalar al Norte de la isla.

En cuanto a las áreas que presentan riesgo bajo a muy bajo se encuentran zonas puntuales localizadas en límites con el borde litoral, específicamente en el sector de Fisher Rock, Tom Hooker, Old Sand y Four Corner al sur de la isla, sector de Hoffie en la Vía a San Luis, Little

Root Bay en la Vía circunvalar, Zotas, algunos segmentos de Sprath Bight como el Maryland, Barrio School House y Constant Spring en el sector de Morrislanding.

Las acciones recomendadas en cada categoría de riesgo que se presentan en el presente documento, se fundamentan en las definiciones de Intervenciones Correctivas, Prospectivas y Mitigación del Riesgo estipuladas en la Ley 1523/2012, por medio de la cual se adoptó la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres como se describe a continuación:

Intervenciones correctivas: “Están relacionadas con las reducción del nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Intervenciones prospectivas: Garantizan que no surjan nuevas situaciones de riesgo a través de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos ante posibles eventos peligrosos. Su objetivo último es evitar nuevo riesgo y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro. La intervención prospectiva se realiza primordialmente a través de la planificación ambiental sostenible, el ordenamiento territorial, la planificación sectorial, la regulación y las especificaciones técnicas, los estudios de prefactibilidad y diseño adecuados, el control y seguimiento y en general todos aquellos mecanismos que contribuyan de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la infraestructura, los bienes y la población.

***Mitigación del riesgo:** Corresponde a las medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente”.*

Teniendo en cuenta lo anterior, las zonas clasificadas como de muy alto riesgo, deben ser objeto de intervenciones correctivas y de mitigación del riesgo con miras a disminuir los fenómenos amenazantes que para la zona caracterizada se relacionan con disposición de residuos sólidos, presencia de cementerios y red de pozos profundos sin un perímetro de protección definido, tales como mayor control en los sitios ilegales de disposición de chatarra y residuos sólidos en general, mejoramiento de la cobertura del alcantarillado sanitario para la zona del Cove, mejoramiento de infraestructura relacionada con pozos sépticos y su impermeabilización, requerimiento del establecimiento de perímetros de protección de las captaciones de agua subterránea de uso comercial y doméstico presentes en el área, actualización e implementación del plan de manejo de cementerios formulado por CORALINA con miras a realizar el saneamiento de estos, con el objeto de reducir la infiltración de sus residuos líquidos al acuífero, mejorar el control de las actividades de agrosilvopastoriles, las cuales también están aportando contaminantes disperso a la zona no saturada, y si bien no hacen parte de esta investigación precisamente por connotación dispersa, está comprobado por CORALINA que estas actividades contaminan los acuíferos. Por otro lado se debe hacer un llamado a la aplicación efectiva de lo estipulado en el Plan de Manejo de la Cuenca El Cove, con la intervención de todas las instituciones, con miras a la reducción de la disposición de residuos líquidos y sólidos que se hace en la cuenca, y que se viene proliferando por falta de control de todas las entidades.

Las zonas clasificadas como de Alto riesgo, no por encontrarse en esta categoría requieren menos atención, es precisamente la localización de esta área que implica el desarrollo de más acciones de intervenciones prospectivas, correctivas y de mitigación del riesgo, en primera instancia por su mayor densidad poblacional, traducida a una mayor demanda de recursos y mayor disposición de residuos líquidos y sólidos en áreas en las que el acuífero puede ser afectado por la superficialidad de sus niveles. Esta es un área muy compleja debido a que confluyen además de la zona urbana de la isla, sectores subnormales e ilegales que no cuentan con cobertura de servicios públicos en un 100%, por lo cual acuden a alternativas de manejo como pozos sépticos mal diseñados o con base en tierra, utilización de captaciones de agua subterránea domésticas sin protección y vertimiento directo de aguas grises y negras al subsuelo. Es necesario para esta zona a modo de Intervención Prospectiva, realizar acciones tendientes al mejoramiento en la prestación de servicios públicos y de legalización de sectores subnormales e ilegales, con el fin que las medidas de regulación de infracciones ambientales como vertimientos directos de aguas grises y negras al subsuelo sean efectivas, toda vez que en poblaciones subnormales el déficit en servicios públicos conlleva a las acciones contaminantes mencionadas, convirtiéndose esto en un ciclo interminable, por otro lado y no menos importante es fundamental el control poblacional, toda vez que esta zona corresponde a la de mayor urbanización y donde encuentra concentrada la gran mayoría de la población. En cuanto intervenciones correctivas y de mitigación del riesgo es necesario aplicar con rigurosidad la normatividad relacionada con la construcción de pozos sépticos en la zona urbana, requerimiento del establecimiento de perímetros de protección de las captaciones de agua subterránea de uso comercial y doméstico, mejoramiento de la prestación de servicios públicos como el de

recolección de basuras y su mejoramiento en la recolección cuanto a los residuos relacionados con chatarras, electrodomésticos, entre otros, que no son recolectados por la empresa prestadora de servicios y que debido a esto son abandonados en las vías y espacios públicos.

Para las áreas de riesgo moderado y bajo se deben implementar intervenciones prospectivas relacionadas básicamente con el mejoramiento en la prestación de servicios públicos, con el fin que las medidas de regulación de infracciones ambientales como vertimientos directos de aguas grises y negras al subsuelo sean efectivas, mejoramiento en la recolección de basuras en cuanto a los residuos relacionados con chatarras, electrodomésticos, y línea blanca en general y en cuanto intervenciones correctivas y de mitigación del riesgo es necesario aplicar con rigurosidad la normatividad relacionada con la construcción de pozos sépticos, requerimiento del establecimiento de perímetros de protección de las captaciones de agua subterránea de uso comercial y doméstico.

Los métodos aquí empleados para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo a la contaminación de acuíferos kársticos, sin bien hacen parte de las mejores herramientas planteadas para estos medios en la literatura mundial, presentaron varios inconvenientes debido a las limitantes en la información disponible en la isla de San Andrés, por lo cual fue necesario adaptar y utilizar métodos híbridos, pero igual de válidos con comprobaciones exitosas a nivel mundial.

Tal es el caso del método COP planteado por COST Action 620, en donde éste tiene varias ventajas respecto a los otros, debido a que ha permitido hacer comparaciones en zonas con

diversas características climatológicas, hidrogeológicas y geológicas e incluso con otros métodos, lo que ha permitido realizar comprobación de procedimientos, sin embargo el parámetro O de estratos suprayacentes requiere información que en la actualidad no ha sido cartografiada para la isla, tal como el espesor del suelo, por otro lado en cuanto al parámetro C de concentración de flujo este requiere la cartografía de morfología kárstica al detalle, la cual a la fecha no cuenta con información.

Se descartó por otro lado los métodos EPIK y PI, propuestos en COST Action 620, debido a que aunque el primero está diseñado específicamente para acuíferos kársticos y tiene variables de gran importancia, la isla no cuenta con la disponibilidad o el levantamiento de la información relacionada con Epikarts acerca del desarrollo o conexión de las redes kársticas, y con presencia o ausencia de red kárstica y grado de desarrollo de esta; ya que por un lado en cuanto a la identificación directa, de cuevas, sumideros y sistemas de cuevas activos no se cuenta con información completa, y por otro, en cuanto a los métodos indirectos para determinar la red los hidrogramas de flujo podrían construirse, sin embargo estos tienen limitaciones en áreas donde la evapotranspiración es importante, como en el caso de San Andrés. El tiempo de tránsito medio basado en ensayos de trazadores, tampoco puede ser implementado en este momento debido a que los ensayos realizados a la fecha no han arrojado información de velocidad o dirección del flujo.

Respecto al método PI, que incluye parámetros tales como la efectividad de la cubierta protectora, requiere además del espesor de la misma, la conductividad hidráulica de los estratos situados entre la superficie del terreno y la superficie del agua subterránea, variable no

cuantificada hasta el momento. De igual forma, el factor que indica el grado en que la cubierta protectora es traspasada por concentraciones de flujo superficiales requiere la conductividad hidráulica del suelo saturado, variable no calculada debido a que los ensayos de pozos con pozo de observación no han arrojado resultados capaces de generar esta información.

Por lo anterior se utilizó para el cálculo de vulnerabilidad intrínseca, el método genérico o aplicable a todo tipo de acuíferos denominado GOD, con el fin de realizar comparaciones con el comportamiento real de los acuíferos en la isla de San Andrés y definir el que más se acerque a dichas condiciones, y para el cálculo de amenazas y riesgo si se logró aplicar las metodologías establecidas en COST Action 620, para acuíferos kársticos.

La información espacial arrojada por la aplicación de estos métodos, se encuentra contenida en una Geodatabase que se presenta en el Anexo 1.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En el marco del presente trabajo se logró la aplicación de herramientas cartográficas disponibles con el software utilizado y su validación, por medio de maximizar el uso de las mismas no solo aplicando de forma mecánica las opciones disponibles, si no cuestionando lo modelado con la realidad, por medio de la determinación de tendencias de distribución de datos, tendencias topográficas, entre otras en la información geográfica, para al final poder generar un modelo lo más cercano a la realidad piezométrica de los kárst en la isla de San Andrés, y de la implementar las metodologías recomendadas para acuíferos kársticos por la Acción Europea COST 620 para la evaluación de la amenaza y riesgo de contaminación hacia las aguas subterráneas y la metodología GOD para el cálculo de la vulnerabilidad, con lo anterior se logró obtener un producto final denominado mapa de riesgos por contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, en el que se logró espacializar de forma categorizada el riesgo a la contaminación de los acuíferos en la Isla y se logró determinar las aéreas de afectación o perímetros, por medio de una formulación basada en aspectos hidrogeológicos, naturaleza de los puntos de contaminación, el uso del suelo correspondiente y la influencia de otros puntos críticos aledaños.

- Se logró construir un mapa de amenaza o índice de peligrosidad HI, a partir del inventario de puntos contaminantes con información multitemporal suministrada por CORALINA, cuya base de trabajo es la hipótesis que cualquier área expuesta en algún periodo de tiempo a una sustancia contaminante puede retener el contaminante y generar contaminación del suelo y zona no saturada y permanencia en el mismo, con potencial de contaminación a futuro producto del arrastre de los contaminantes por efectos del agua lluvia, puntos a los cuales se les asoció el uso del suelo y un buffer o área de influencia dependiente del tipo de contaminante, parámetros hidrogeológicos, naturaleza del contaminante y su distancia a otros focos de contaminación.
- Se logró aplicar la metodología GOD para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca, con la superposición de parámetros como geología, hidrogeología, suelos y piezometría, la cual fue objeto de revisión y análisis estadístico y geoestadístico, con el fin de hacerla lo más precisa posible y cercana a la realidad de la complejidad que ofrecen los sistemas karsticos.
- En la construcción de los mapas piezométricos de mayor interés y representatividad para los efectos del trabajo, se seleccionó de la información piezométrica los registros de los años durante los cuales los niveles freáticos presentaron valores críticos por debajo del nivel del mar, realizando la comparación de los periodos secos y húmedos con los fenómenos de variabilidad climática ENSO (El Niño Southern Oscillation), mejor conocido en sus fases extremas como Niño (Fase cálida) y Niña (Fase fría), concluyéndose que los años con mayor índice ONI corresponden a 1997 (Abril a junio) – 1998 (Marzo a Mayo), 2002 (abril a junio) – 2003 (enero a marzo) y 2009 (junio a agosto) – 2010 (marzo a mayo), por lo cual los periodos a modelar deberían ser 1997-1998, 2002-2003 y 2009 -2010.

- La información piezométrica seleccionada, también fue sometida a validación por dos diferentes métodos de interpolación de datos puntuales para la generación del mapa de isovalores de profundidad. Los métodos evaluados fueron IDW y Kriging Simple y Kriging Ordinario, concluyéndose que el método IDW tiende a producir patrones poco reales, que el método Kriging se comportó mejor debido a que la interpolación realizada con este método es mucho más real respecto a los valores encontrados en campo y se procedió entonces a realizar las validaciones entre el Kriging simple y ordinario, observándose que este último representa mejor la superficie piezométrica respecto a la superficie modelada con el simple. Sin embargo, debido a que se determinó influencia direccional dada por la topografía y forma de las isla, esta tuvo que ser removida realizando la incorporación de la tendencia al proceso de interpolación.

- En cuanto a los resultados obtenidos de la vulnerabilidad, se concluye que los años 1997 y 1998 no presentaron variaciones aunque representaban dos períodos diferentes para un mismo año Niño, los años 2002 y 2003 evidencian variaciones en cuanto a las áreas de vulnerabilidad extrema, ya que son mayores para el año 2003 que para 2002, y se encuentran relacionadas posiblemente con procesos de recarga en el acuífero San Luis, que posibilita mayor cercanía de la superficie freática a la superficie, los años 2009 y 2010, evidencian variaciones en cuanto a las áreas de vulnerabilidad extrema, ya que disminuyen en 2010 en comparación con el año 2009 y en el caso de la vulnerabilidad moderada generada en 2009, en algunos casos pasa a vulnerabilidad Alta para 2010. Se observa también que en 2010 incrementan las áreas de vulnerabilidad alta y disminuyen las áreas de vulnerabilidad extrema. Entre los tres períodos seleccionados, es evidente que las áreas de vulnerabilidad extrema disminuyen

considerablemente desde 1997 hasta 2010, lo cual es debido a la variación en profundidad de los niveles freáticos y a su profundización a lo largo de los años, lo cual hace que sean de menos accesibilidad a los contaminantes. Sin embargo, esta situación trae consigo otro tipo de interpretaciones, como la posibilidad de la disminución en la recarga de los acuíferos, lo cual hace que la tabla de agua se encuentre más profunda con los años, posibilitando un desabastecimiento en cierta medida.

- El producto final de este estudio se denominó mapa de riesgos por contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés, en el que se logró espacializar de forma categorizada el riesgo a la contaminación de los acuíferos en la Isla, evidenciando zonas que requieren de la aplicación a corto y mediano plazo de estrategias de protección, toda vez que corresponden a zonas muy vulnerables a las amenazas identificadas y que arrojan un riesgo igualmente alto.

- Se concluyó que las zonas de muy alto riesgo a la contaminación se encuentran concentradas principalmente en la parte central de la isla (En sentido Sur - Norte, desde Lions Hill incluyendo la Cuenca del Cove y la ensenada del Cove hasta Court House y en sentido Este - Oeste desde el Barack hasta Linval), en donde si bien los niveles freáticos tienen mayor profundidad, se determinó la presencia de agentes amenazantes con alto potencial de contaminación, que le imprimen un alto riesgo a esta área, relacionados principalmente con la presencia de zonas de disposición de residuos, presencia de cementerios y red de pozos profundos sin un perímetro de protección definido y deben ser objeto de intervenciones correctivas y de mitigación del riesgo con miras a disminuir los fenómenos amenazantes.

- Las zonas con riesgo alto de contaminación se localizaron principalmente alrededor de la zona de muy alto riesgo y hacia el norte de la isla, situación acorde con características como alta población concentrada en esta área, niveles freáticos superficiales, fenómenos amenazantes relacionados con la gran densidad de captaciones de agua subterránea domesticas sin protección, mayor densificación de pozos sépticos y pozos costeros que se comportan como conductos directos para el ingreso de contaminación hacia los acuíferos, presencia de cementerios y puntos de concentración de residuos líquidos y sólidos entre otros que contribuyen a un riesgo alto más densificado en el territorio y deben ser objeto de intervenciones prospectivas, correctivas y de mitigación del riesgo, en primera instancia por su mayor densidad poblacional, traducida a una mayor demanda de recursos y mayor disposición de residuos líquidos y sólidos en áreas en las que el acuífero puede ser afectado por la superficialidad de sus niveles.
- Las áreas que presentan riesgo moderado se representaron de forma localizada en sectores tales como Pusey Hill y Clay Mount en la zona central de la isla, Vía San Luis a la altura de Four Corner, Sector del Bay y Backers Hill hasta Bruns Bank y en algunos sectores de la Vía Circunvalar al Norte de la isla y deben ser objeto de intervenciones prospectivas relacionadas básicamente con el mejoramiento en la prestación de servicios públicos.
- Las áreas que presentan riesgo bajo a muy bajo se encuentran zonas puntuales localizadas en límites con el borde litoral, específicamente en el sector de Fisher Rock, Tom Hooker, Old Sand y Four Corner al sur de la isla, sector de Hoffie en la Vía a San Luis, Little Root Bay en la

Vía circunvalar, Zotas, algunos segmentos de Sprath Bight como el Maryland, Barrio School House y Constant Spring en el sector de Morrislanding.

- Las acciones recomendadas en cada categoría de riesgo que se presentan en el presente documento, se fundamentan en las definiciones de Intervenciones Correctivas, Prospectivas y Mitigación del Riesgo estipuladas en la Ley 1523/2012, por medio de la cual se adoptó la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres como se describe a continuación:

- *Intervenciones correctivas: “Están relacionadas con las reducción del nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.*

- *Intervenciones prospectivas: Garantizan que no surjan nuevas situaciones de riesgo a través de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos ante posibles eventos peligrosos. Su objetivo último es evitar nuevo riesgo y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro. La intervención prospectiva se realiza primordialmente a través de la planificación ambiental sostenible, el ordenamiento territorial, la planificación sectorial, la regulación y las especificaciones técnicas, los estudios de prefactibilidad y diseño adecuados, el control y seguimiento y en general todos aquellos mecanismos que contribuyan de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la infraestructura, los bienes y la población.*

- *Mitigación del riesgo: Corresponde a las medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente”.*

- Los métodos aquí empleados para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo a la contaminación de acuíferos kársticos, sin bien hacen parte de las mejores herramientas planteadas para estos medios geológicos en la literatura mundial, presentaron varios inconvenientes debido a las limitantes en la información disponible en la isla de San Andrés, por lo cual fue necesario adaptar y utilizar métodos híbridos, pero igual de válidos con comprobaciones exitosas a nivel mundial, por lo que se utilizó para el cálculo de vulnerabilidad intrínseca, el método genérico o aplicable a todo tipo de acuíferos denominado GOD, con el fin de realizar comparaciones con el comportamiento real de los acuíferos en la isla de San Andrés y definir el que más se acerque a dichas condiciones, y para el cálculo de amenazas y riesgo se logró aplicar las metodologías establecidas en COST Action 620, para acuíferos kársticos.

ANEXO 1.

GEODATABASE, METADATOS Y DICCIONARIO DE DATOS

Para efectos de generar la Geodatabase del presente trabajo, se procedió a plantear el esquema de base de datos espacial en Arc Catalog, con el fin de proveer un marco estandarizado de entidades espaciales (datos geográficos) definidas por un tipo de geometría (punto, línea, polígono) y una referencia geográfica (coordenadas X, Y), realizar la automatización de datos y finalmente realizar el cargue de datos en GDB (Ver Figuras 52, 53 y 54), su respectivo diccionario de datos y metadatos incorporados (Figura 55)

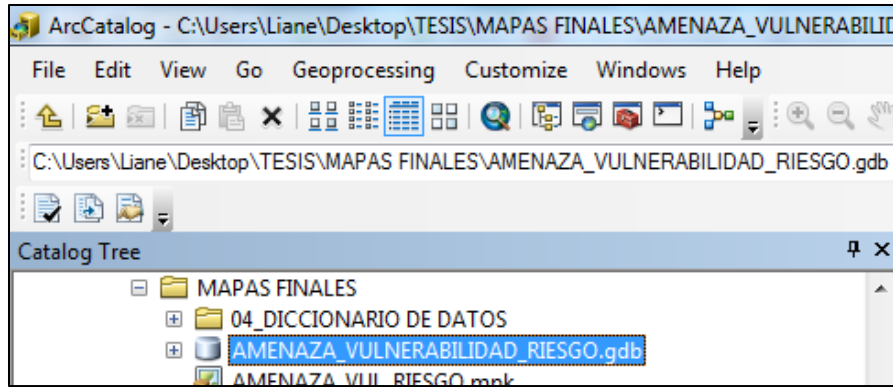


Figura 52 Geodatabase AMENAZA_VULNERABILIDAD_RIESGO

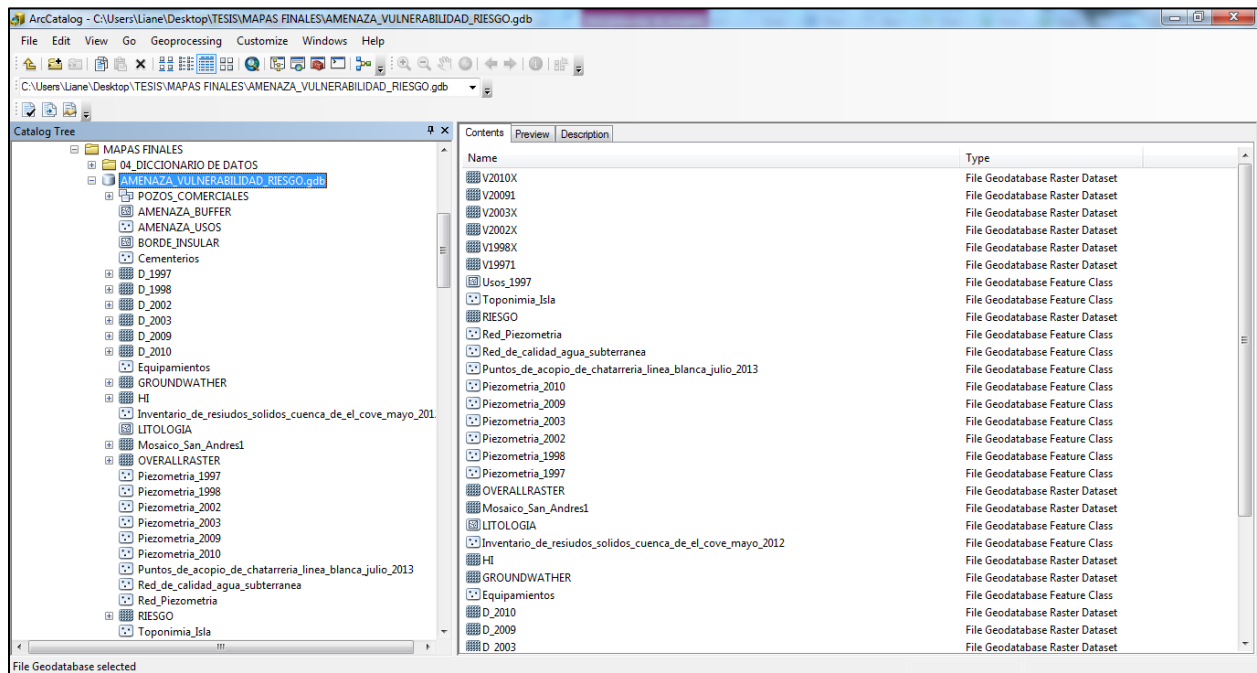


Figura 53 Datos cargados en la Geodatabase

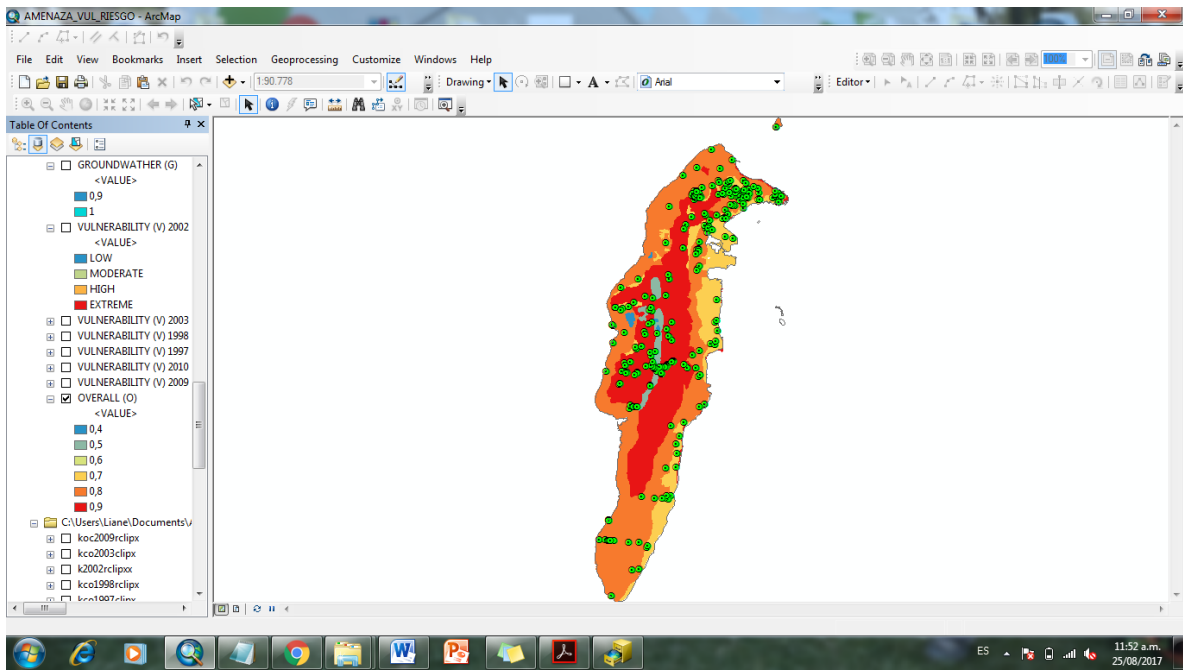


Figura 54 Visualización de la Geodatabase en ArcMap.

BIBLIOGRAFIA

Ángel C. (1993). Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Hidrogeología de la isla de San Andrés”. INGEOMINAS.

Cañas H., y Martínez C. (1993). Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Recuperación, Mantenimiento y Pruebas de Bombeo en el Campo de Pozos de la Isla de San Andrés”. INGEOMINAS.

Coaguila D., et Al. (2013). Análisis Comparativo de Métodos de Interpolación Espacial, Utilizando Datos de Evapotranspiración. XVI Simposio Brasileiro de Sensoramiento Remoto – SBSR. Brazil.

CORALINA (2000). Plan de Manejo de las Aguas Subterráneas (PMAS), Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

CORALINA (2005). Plan de Manejo de la Cuenca del Cove, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Diezemann (1957). Aprovechamiento del Depósito de Agua Subterránea Dulce en la Isla De San Andrés en Boletín Geológico, vol V. num 1,. Pag 87-109.

Gamboa, L. (2013). Sig de Zonificación de la Vulnerabilidad a la Contaminación En Los Acuíferos De La Isla De San Andrés. Tesis y otros Trabajos de Grado, Universidad de Manizales, Facultad De Ciencias E Ingeniería, Especialización En Sistemas De Información Geográfica, Cohorte VII.

Guzmán G., y Hernández O. (1992). Cartografía Geológica de la Isla de San Andrés, INGEOMINAS.

IGAC (1998), Estudio Detallado de Suelos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Huguett, A. (1989). Compilación Hidrogeológica De Las Islas De San Andrés Providencia Y Santa Catalina Colombia. INGEOMINAS.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2012). Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno “El Niño” en el periodo 2012-2013 en Colombia. Bogotá D.C.

INGEOMINAS (1998). Estudio de Contaminación de Acuíferos en la Isla de San Andrés "Perforación y Construcción de la Red de Piezómetros del Sur de la Isla de San Andrés,

Construcción de 12 piezómetros (PP-IV-1, PP-III-1, PP-II-1, PP-I-1, PP-III-6, PP-III-3, PP-III-4, PP-II-2, PP-II-3, PP-II-3.PP-0-1, PP-0-2).

INGEOMINAS (1997). Caracterización y Modelación del Régimen de las Aguas Subterráneas. Evaluación del Riesgo de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Isla de San Andrés.

Jiménez M., A. et al. (2010). Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Cañete (sur de España). Boletín Geológico y Minero, 121 (2): 139-152 ISSN: 0366-0176.

Kocurko M. (1972). A Paleoenvironmental investigation of San Andrés Island, Colombia: A study carbonates Rocks.

Mena, G. & Montes, J. (2010). Evaluación de la Vulnerabilidad de las Aguas Subterráneas Aplicada al Antiguo Botadero de Desechos Sólidos de Mariona, Departamento de San Salvador. Universidad del Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil. Para optar al título de Ingeniero Civil.

Morales T, ET Al. (2007). Los Acuíferos Kársticos. Casos del País Vasco. The karstic aquifers. Cases of the Basque Country Iñaki. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. (15.3) 325-332 I.S.S.N.: 1132-9157.

PERFOPOZOS LTDA, (1986). Informe técnico Pozos No. 16, 17, 19, 21 y 22 Zonas Harmony Hall Hill, Zona Electrificadora y Zona Cove.

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

Proyecto INAP-Colombia”, CORALINA - Facultad de Minas Universidad Nacional. (2010). Informe Final “Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso.

Rosas & Díaz, (1997). Identificación y Formulación Del Modelo Hidrogeológico Conceptual De La Isla De San Andrés. Tesis y otros Trabajos de Grado, Universidad Nacional de Colombia.

Toro (2000). Diagnóstico del Riesgo y Grado de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la Isla de San Andrés. Artículo de una publicación seriada (Revista). CORALINA.

Vargas G. (1999). Geología de la Isla de San Andrés. Memoria Explicativa. BOGOTA INGEOMINAS.

Vargas M. (1993). Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Estudio Hidroquímico de la Isla de San Andrés”. INGEOMINAS.

Vásquez E. (1993). Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Prospección Geoeléctrica en la Isla de San Andrés” INGEOMINAS.

Vergara V., Gutiérrez G., Flórez H. (2009). Evaluación de la Vulnerabilidad del Acuífero Morroa a Contaminación por Plaguicidas Aplicando la metodología DRASTIC. Artículo Científico. Ingeniería y Desarrollo Numero 26, Julio-diciembre. ISSN: 0122-3461. Universidad de Sucre, Sincelejo (Colombia).

Vías, J.M. et al. (2006). Aplicación del método COP para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero carbonático de Bausclotter Platte (Alemania). Comparación de resultados de otros acuíferos del sur de España. En: Duran, J.J., Andreo, B y Carrasco, F. (Eds). Karts, cambio climático y aguas subterráneas. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas. N 18. 248-256. Madrid.

Villatoro, M. Et Al. (2008). Comparación de los Interpoladores IDW y Kriging en la Variación Espacial de Ph, Ca, CICE y P del Suelo. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

WEBGRAFIA

Determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a través del método DRASTIC utilizando ArcGIS 9.3. Agua y SIG, Hidrología, Arcgis y Agua Subterránea. (Febrero 2011). Recuperado de: <http://www.aguaysig.com/2011/02/determinacion-de-la-vulnerabilidad-de.html>

European Commission. Directorate-General for Research, 2003 EUR 20912. COST Action 620, Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report. 2003. Recuperado de: <http://europa.eu.int>.

Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. (2007) IGME. Serie: HIDROGEOLOGÍA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS. ISBN: 84-7840-496-1. Recuperado de: http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro107/pdf/lib107/in_07.pdf